



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ RÁMU OBRÁBĚCÍHO STROJE

COMPUTATIONAL MODELLING OF MACHINE TOOL FRAME

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. DOMINIK HERMANSKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. LUBOMÍR NOVOTNÝ, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Dominik Hermanský

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Výrobní stroje, systémy a roboty (2301T041)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Výpočtové modelování rámu obráběcího stroje

v anglickém jazyce:

Computational modeling of machine tool frame

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem diplomové práce realizuje deformační a napjatostí analýza rámu svislého soustružnického obráběcího centra užitím metody konečných prvků. Nedílnou součástí diplomová práce je deformační a napjatostí analýza rámu obráběcího stroje při teplotním zatěžování vznikající při provozu pohybových mechanismů, kterými je stroj vybaven. Okrajové podmínky je možné určit na základě analýzy kinematiky a dynamiky silových účinků od obrábění a měření na stroji již realizovaných. Cílem diplomové práce je vytvoření vhodného výpočtového modelu, jeho verifikace s praktickými poznatky a návrhy řešení nežádoucích stavů. K numerickým výpočtům bude použit MKP systém Autodesk Simulation a Autodesk Inventor Professional, ANSYS.

Cíle diplomové práce:

- seznámení se studovanou problematikou a literární rešerše zaměřená na studovanou problematiku,
- formulaci řešeného problému a jeho analýzu a vymezení cílů práce, o návrh a popis metodického přístupu k řešení,
- vlastní analýzu – výpočtové modelování,
- porovnání získaných výsledků s experimentálními daty,
- diplomová práce obsahuje podrobný popis použitých modelů, metod, postupů, o interpretaci získaných údajů a závěry.

Seznam odborné literatury:

1. Vince Adams, Vince Adams: Building Better Products with Finite Element Analysis. OnWord Press, 1998.
2. Janíček, P., Ondráček, E.: Řešení problémů modelováním. Téměř nic o téměř všem. FS VUT, Brno, 1998.
3. Janíček, P., Ondráček, E, Vrbka J.: Mechanika těles - Pružnost a pevnost I. FS VUT, Brno, 1992.
4. Janíček, P., Ondráček, E, Vrbka J.: Mechanika těles - Pružnost a pevnost II. FS VUT, Brno, 1998.
5. Marek, J.; Novotný, L.; Smolík, J.; Blecha, P.; Bbřezina, T.; Mrkvica, I.; Sulitka, M.; Učeň, O.; Konstrukce CNC obráběcích strojů.
6. Dokumentace CAD a FEM programů.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Lubomír Novotný, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 18. 11. 2013

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

Abstrakt:

Predmetom diplomovej práce je vytvorenie výpočtového modelu rámu zvislého sústružníckeho centra. Vplyvom pohybových častí sa generuje teplo a prenáša sa do rámu. Bol vytvorený model, ktorý slúži pre výpočet rozloženia teplôt v ráme a následných teplotných deformácií spôsobených teplotnými gradientmi.

Abstract:

The subject of my master's thesis is creating a computational model of a vertical turning centre frame. The frame is influenced by the heat generated in a motion system. The computational model was created to evaluate a temperature distribution in machine frame structure and thermal deformations caused by temperature gradients.

Kľúčové slová

zvislé sústružnícke centrum, výpočtový model, teplotná analýza, deformačná analýza, metóda konečných prvkov

Key Words

vertical turning centre, computational model, thermal analysis, deformation analysis, finite element method

Bibliografická citácia práce:

Hermanský, D. *Výpočtové modelování rámu obráběcího stroje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 73 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Lubomír Novotný, Ph.D.

Čestné prehlásenie:

Prehlasujem, že som diplomovú prácu vypracoval samostatne s použitím uvedených zdrojov,
pod odborným vedením Ing. Lubomíra Novotného, Ph.D.

V Brne 30.5.2014

.....

Dominik Hermanský

Pod'akovanie:

Touto cestou by som chcel pod'akovať vedúcemu práce Ing. Lubomírovi Novotnému, Ph.D. za jeho cenné rady a pripomienky pri tvorbe diplomovej práce.

Taktiež moja vďaka patrí Ing. Synkovi za jeho rady z praxe v oblasti teplotných deformácií zvislých sústružníckych centier.

Obsah

1. ÚVOD	13
2. ÚVOD DO TERMOMECHANIKY	15
2.1. <i>Termodynamika</i>	15
2.1.1. <i>Teplotná rozťažnosť</i>	15
2.2. <i>Prenos tepla (Termokinetika)</i>	16
2.2.1. <i>Prenos tepla vedením</i>	16
2.2.2. <i>Prenos tepla prúdením</i>	17
2.2.3. <i>Prenos tepla žiarením</i>	17
2.2.4. <i>Diferenciálna rovnica energie</i>	18
3. TEPLOTNÉ DEFORMÁCIE OBRÁBACÍCH STROJOV	19
3.1. <i>Zdroje teplotných chýb</i>	19
3.2. <i>Rozdelenie teplotných chýb</i>	20
4. MERACIE TECHNIKY	21
4.1. <i>Meranie teplotných deformácií</i>	21
4.2. <i>Meranie volumetrickej presnosti</i>	22
4.3. <i>Meranie teplôt</i>	23
5. URČOVANIE A KOMPENZÁCIA TEPLOTNÝCH CHÝB.....	24
5.1. <i>Možnosti odstránenia teplotných chýb</i>	24
5.2. <i>Softvérová kompenzácia</i>	26
5.2.1. <i>Viacnásobná lineárna regresia</i>	26
5.2.2. <i>Prenosová funkcia</i>	26
5.2.3. <i>Ďalšie systémy vytvárania modelov</i>	26
5.3. <i>Numerické modelovanie teplotných chýb</i>	27
5.4. <i>Okuma Thermo-Friendly Concept</i>	28
6. TEÓRIA MODELOVANIA [16]	29
6.1. <i>Základné atribúty modelovania</i>	29
6.2. <i>Zovšeobecnená štruktúra modelu</i>	30
6.3. <i>Výpočtové modelovanie</i>	31
7. RÁM ZISLÉHO SÚSTRUŽNÍCKEHO CENTRA.....	32
7.1. <i>Analýza problému $P(\Omega)$</i>	32
7.2. <i>Jednotný scenár riešenia problémov</i>	34
7.3. <i>Vytváranie systému podstatných veličín</i>	34
7.4. <i>Typ problému</i>	43
8. VÝBER METÓDY RIEŠENIA, SOFTVÉRU A HARDVÉRU.....	44

8.1.	<i>Výber metódy riešenia</i>	44
8.2.	<i>Použitý softvér.....</i>	44
9.	METÓDA KONEČNÝCH PRVKOV.....	45
9.1.	<i>Statické pevnostné výpočty.....</i>	45
9.2.	<i>Prenos tepla vedením.....</i>	46
10.	TVORBA VÝPOČTOVÉHO MODELU.....	47
10.1.	<i>Pevná časť rámu.....</i>	47
10.1.1.	Model č. 1.....	50
10.1.2.	Model č.2.....	55
10.1.3.	Model č. 3.....	58
10.2.	<i>Pohyblivá časť.....</i>	61
11.	VYUŽITEĽNOSŤ MODELU	62
11.1.	<i>Statické namáhanie.....</i>	62
11.2.	<i>Nestacionárna analýza vedenia tepla.....</i>	64
	ZÁVER	70
	POUŽITÉ INFORMAČNÉ ZDROJE	71
	ZOZNAM OBRÁZKOV A TABULIEK	72
	PRÍLOHY	73

1. ÚVOD

V posledných dekádach sme boli svedkom významného pokroku v oblasti výrobných strojov. Výskumné úspechy v oblasti mechatroniky a automatizácie dali výrobnej technike úplne novú tvár. Významným míľnikom bol prechod od konvenčných strojov k NC resp. CNC riadeniu. Taktiež implementácia viacerých technologických operácií na jednom stroji bola významným pokrokom. V priebehu historického vývoja sa tiež neustále zvyšovali požiadavky na presnosť, efektívnosť, spoľahlivosť.

Každý výrobný stroj možno chápať ako sústavu „stroj – nástroj – obrobnok“ (niekedy ešte aj pripravok). Presnosť potom môžeme definovať ako chyby stroja, ktoré ovplyvňujú polohu špičky nástroja. Pri obrábaní sa táto chyba preniesie na obrobnok a vzniká výrobná nepresnosť. Jeden z hlavných faktorov, ktorý má najväčší vplyv pri generovaní výrobných chýb je teplota, resp. vzniknuté teplo, ktoré sa šíri naprieč konštrukčnými celkami stroja. A práve o tomto type nežiaduceho účinku pojednáva moja diplomová práca.

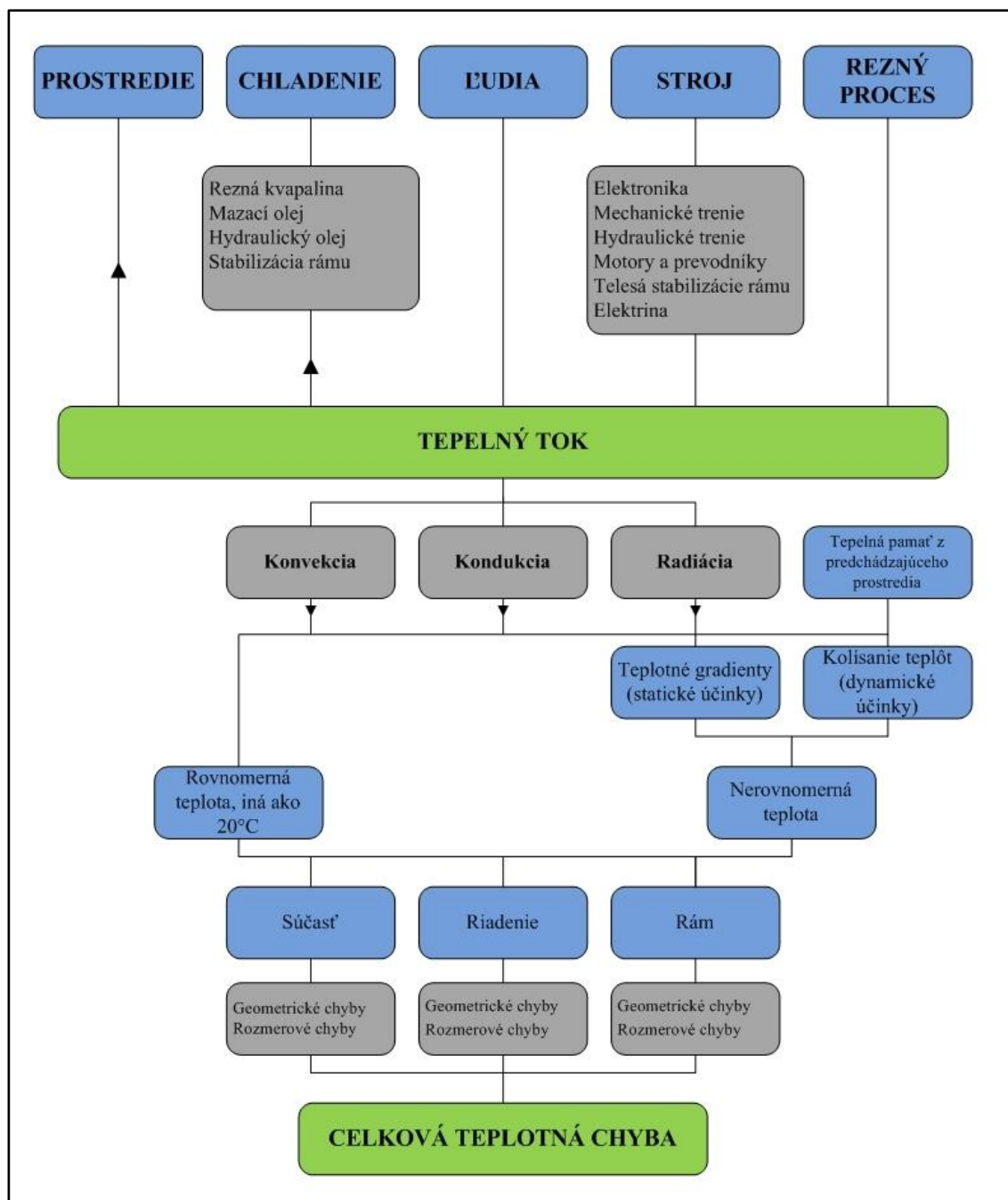
Po úvodnej časti, kde sú vymedzené základné pojmy a vzťahy z termodynamiky je rešeršným spôsobom opísaná problematika teplotných deformácií v oblasti výrobných techník. Kapitoly sú radené postupne od analýzy možných príčin a typov zdroja teplotných rozdielov, cez ich kvantifikáciu experimentálnymi metódami a nástrojmi numerickej matematiky, či iných modelovacích prostriedkov, až po uvedenie metód pre zníženie alebo takmer úplné odstránenie týchto nežiaducich javov.

Praktickým problémom tejto práce je vytvorenie výpočtového modelu rámu obrábacieho stroja, preto po rešeršnej časti z oblasti teplotných deformácií je čitateľ uvedený do problematiky modelovania. Tu sú zhrnuté základné princípy vytvárania modelových objektov s využitím moderného a v praxi často zanedbávaného systémového prístupu k riešeniu problémových situácií.

Nasleduje riešenie konkrétneho problému, ktorý bol zadaný spoločnosťou Toshulin, ktorej výrobný program sa orientuje na zvislé sústružnícke centrá (karusely). Výstupom práce je výpočtový model zvislého sústružníckeho centra rady Forceturn, ktorý bol zostavený na základe priradenia systému podstatných veličín modelovému objektu. Model bude v praxi slúžiť pre skúmanie teplotných vplyvov, prípadne ako súčasť vývojového reťazca pri navrhovaní nových strojov s obdobnou štruktúrou, s cieľom znížiť nepriaznivé účinky teplotnej rozťažnosti.

Na obrázku je zobrazená schematická štruktúra, ktorá poskytuje prehľadný súhrn hlavných pojmov týkajúcich sa teplotných deformácií obrábacích strojov a vzťahov medzi nimi. Jednotlivé prvky budú vysvetlené v ďalšom texte.

Obr. č. 2.1-1 Schematický prehľad základných pojmov [1]



Poznámka:

Diplomová práca je písaná v slovenskom jazyku. Väčšina informácií pochádza zo zdrojov v angličtine a češtine, preto je potrebné uviesť, že boli použité vlastné preklady.

2. ÚVOD DO TERMOMECHANIKY

Termomechanika je časť fyzika, ktorá sa zaoberá tepelnými javmi. Aj keď nie je vymedzená ostrá hranica medzi jednotlivými jej časťami, je možné ju rozdeliť na dve základné skupiny:

- Termodynamika
- Prenos tepla (niekedy aj Termokinetika)

2.1. Termodynamika

Jeden zo základných pojmov termodynamiky je termodynamická sústava. Táto sústava má nejaké okolie. V termodynamike sú skúmané interakcie sústavy so svojím okolím. Tieto interakcie sú práca alebo teplo. Termodynamika ale popisuje len koncové stavy medzi ktorými prišlo k interakcii. Predpokladá sa, že sústava je v tepelnej rovnováhe so svojím okolím. Termodynamika je postavená na troch základných zákonoch (vetách). Vzhľadom k tomu, že sa jedná o rozsiahly vedný obor, nebudem podrobne uvádzať všetky zákonitosti. Pre moju prácu je najdôležitejší nasledujúci pojem. [2], [3]

2.1.1. Teplotná rozťažnosť

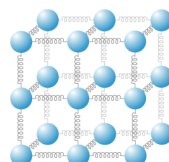
Teplotná rozťažnosť patrí medzi najznámejšie zmeny substancie a je potrebné brať tento jav do úvahy, pri návrhu rôznych technických objektov. Napríklad súčasťou mostových konštrukcií musia byť dilatačné medzery, koľajové trate sa neprípustne deformujú vplyvom vysokých teplôt vzduchu, piest motora musí byť uložený vo valci s vôľou atď.


Obr. č. 2.1-1 Dilatačná medzera mostu (vľavo), deformácia koľajových tratí (vpravo) [5]



Z molekulárneho hľadiska je teplotná deformácia dôsledok zmeny priemernej vzdialenosti atómov v telese. Pre lepšie pochopenie je dobré si predstaviť atómy navzájom pospájané tuhými pružinami (obr. 2.1-2). Pri bežných teplotách atóm osciluje okolo vlastnej rovnovážnej polohy s amplitúdou približne 10^{-11} m a frekvenciou 30 Hz. Priemerný rozstup medzi atómami je asi 10^{-10} m. Pri zvyšovaní teploty začínajú atómy oscilovať s vyššou výchylkou a zväčšuje sa vzdialenosť medzi nimi. V dôsledku toho látka expanduje.

Obr. č. 2.1-2 Predstava atómov navzájom pospájaných tuhými pružinami



	Ústav výrobných strojů, systémů a robotiky	Str. 16
	DIPLOMOVÁ PRÁCA	

Uvažujme teleso, ktorého dĺžka je rádovo vyššia ako jeho priečne rozmery. Predpokladajme, že jeho počiatočná dĺžka je L_i a tá sa zmení vplyvom rozdielnych teplôt ΔT o hodnotu ΔL . Ak sú deformácie vplyvom tepla dostatočne malé vzhľadom k pôvodnému objektu je možné definovať priemernú hodnotu *súčiniteľu lineárnej teplotnej rozťažnosti*:

$$\alpha \equiv \frac{\Delta L/L_i}{\Delta T} \quad (2.1)$$

Z experimentov je dokázané, že pri malých zmenách teploty je možné považovať koeficient za konštantu, pri vyšších teplotných rozdieloch je funkciou teploty. Po úprave rovnice 2.1 dostaneme:

$$\Delta L = \alpha L_i \Delta T \quad (2.2)$$

alebo

$$L_f - L_i = \alpha L_i (T_f - T_i) \quad (2.3)$$

kde L_f je konečná dĺžka, T_i resp. T_f je počiatočná resp. koncová teplota, α [$(^\circ\text{C})^{-1}$] je lineárny súčiniteľ teplotnej rozťažnosti [4]

2.2. Prenos tepla (Termokinetika)

Termodynamika sa nezaobrá vznikom tepla, nerieši ani veľkosť tepelného toku a otázku časového intervalu. Sústava je v tepelnej rovnováhe so svojim okolím. Pre prenos tepla z okolia do sústavy musí existovať teplotný gradient alebo rozdiel teplôt. Termokinetika rieši, ako je možné preniesť určité množstvo tepla do alebo zo sústavy a zároveň chceme túto veličinu kvantifikovať. K základným mechanizmom prenosu tepla patria:

- Vedenie (kondukcia)
- Prúdenie (konvekcia)
- Žiarenie (sálanie, radiácia) [2]

2.2.1. Prenos tepla vedením

Pri tomto spôsobe prenosu energie sú nosičmi mikročastice a prenos sa uskutočňuje ich pohybom a vzájomnými interakciami. Prenos energie smeruje od viac energetických častíc k menej energetickým časticiam. Tieto častice môžu byť molekuly (u kvapalín a plynov) alebo atómy, resp. voľné elektróny (u tuhých látok, resp. kovov). Vedenie tepla je popísané Fourierovým zákonom:

Merný tepelný tok \dot{q} (W/m^2), to jest tepelný tok \dot{Q} vztiahnutý na jednotku plochy S , prenášaný vedením v nejakej látke je priamo úmerný veľkosti teplotného gradientu a má opačné znamienko než tento gradient.

Fourierov zákon pre jednorozmerné (1D) vedenie tepla rovinnou stenou:

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{S} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (2.4)$$

Pre trojrozmerné (3D) teleso potom môžeme písať:

$$\vec{\dot{q}} = -\lambda \vec{\nabla} T = -\lambda \text{grad} T \quad (2.5)$$

$$\text{kde: } \vec{\nabla} T = \frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{k} \quad \text{je teplotný gradient} \quad (2.6)$$

Tepelná vodivosť λ [W/mK] je fyzikálna vlastnosť látky a zároveň konštanta úmernosti vo Furierovom zákone. V skutočnosti však nejde o konštantnú hodnotu. Uvažovanie konštantnej hodnoty tepelnej vodivosti zjednodušuje výpočty. V reálnych situáciách je funkciou teploty. Či je možné použiť uvedené zjednodušenie závisí na druhu látky a na veľkosti teplotného gradientu. [2],[3]

2.2.2. Prenos tepla prúdením

Prenos tepla konvekciou je zložený z dvoch častí:

- Pohyb molekúl – difúzia (podobne ako vedenie tepla) – **KONdukc**cia
- Makroskopický pohyb molekúl, tzn. v určitom okamihu sa veľké množstvo molekúl pohybuje kolektívne – **adVEK**CIA

Zložením týchto dvoch mechanizmov vznikne prenos tepla prúdením - **KONVEK**CIA

Najčastejšie dochádza k prenosu tepla medzi prúdiacou tekutinou a nejakým povrchom, za predpokladu, že majú rozdielne teploty. V blízkosti povrchu sa vytvorí hydrodynamická medzná vrstva, kde sa mení rýchlosť tekutiny z nuly až na tzv. rýchlosť voľného prúdu. Konvekcia môže byť klasifikovaná podľa povahy prúdenia:

- nútená
- prirodzená (voľná)
- kombinovaná

Pri voľnej konvekcii je pohyb vyvolaný rozdielom teplôt medzi stenou a tekutinou, čo spôsobí rozdiel hustôt tekutiny pri stene a v tekutine a tým jej pohyb. Pri vynútenej konvekcii je pohyb vyvolaný rozdielom tlakov v tekutine, teda vonkajšími silami (čerpadlo, ventilátor...) Základným zákonom, ktorým sa riadi konvekčný prenos energie je Newtonov ochladzovací zákon:

Hustota konvekčného tepelného toku je úmerná rozdielu teplôt medzi stenou (T_s) a tekutinou (T_t). Konštanta úmernosti je súčiniteľ prestupu tepla konvekciou α [$W \cdot m^{-2} \cdot K$]. [2],[3]

$$\dot{q} = \alpha(T_s - T_t) \text{ alebo } \dot{q} = \alpha(T_t - T_s) \quad (2.7)$$

[2],[3]

2.2.3. Prenos tepla žiarením

Z každého povrchu, ktorý má nejakú teplotu je emitovaná energia. Tento proces je nazývaný tepelné žiarenie. Žiarenie je proces, ktorý nepotrebuje k prenosu energie hmotnú látku, môže prebiehať i v absolútnom vákuu. Maximálny tepelný tok, ktorý môže byť z povrchu emitovaný je daný Stefan-Boltzmanovým zákonom (Stefan 1879 z experimentov, Boltzman 1884 analyticky):

$$\dot{q} = E_o = \sigma T^4 \quad (2.8)$$

kde $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$] je Stefan-Boltzmanova konštanta a T je teplota povrchu

Index „o“ označuje tzv. čierne teleso, tj. ideálny žiarič, ktorý vyžaruje maximálnu možnú energiu. Pre každý reálny povrch platí:

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2.9)$$

kde ε je pomerná žiarivosť, ktorá je v rozmedzí $0 \leq \varepsilon \leq 1$

[2],[3]

2.2.4. Diferenciálna rovnica energie

U jednoduchých úloh je ľahké vypočítať tepelný tok naprieč telesom. U praktických inžinierskych úloh je ale potrebné vyriešiť kompletne teplotné pole a určiť napr. extrémne teplotné gradienty a s tým spojené deformácie, prípadné tepelné napätie. Preto potrebujeme nejaký nástroj na určovanie teplotných polí v telesách. A tým je diferenciálna rovnica energie, niekedy nazývaná aj rovnica tepelnej difúzie alebo skrátene rovnica vedenia tepla.

Odvedenie rovnice je možné nájsť napríklad v [1], [2]. Odvodzuje sa väčšinou pre 3D telesa a navyše pre nestacionárny prípad (teplotné pole sa mení v čase). Vychádza sa z energetickej bilancie pre elementárny objemový element:

tepelný tok vstupujúci do elementu	+	tepelná energia generovaná v elemente	=	zmena vnútornej energie elementu	+	tepelný tok vystupujúci z elementu
--	---	---	---	---	---	--

rovnica má potom tvar:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q}_{zdroj} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.10)$$

[2]

Poznámka:

Rovnica tepelnej difúzie je základným stavebným prvkom pri určovaní teplotných polí, deformácií, tepelných tokov a napätí numerickými metódami matematiky, najmä Metódou konečných prvkov.

3. TEPLOTNÉ DEFORMÁCIE OBRÁBACÍCH STROJOV

Vzhľadom na neustále sa zvyšujúce nároky na presnosť a produktivitu obrábacích strojov sa zvýšila aktivita v tejto oblasti výskumu. Je badateľný trend neustáleho zvyšovania rezných síl, posuvových síl a otáčok vretien. Následkom toho je vyššia a dynamicky sa meniaci strata výkonu v pohonných sústavách. Vznikajú pasívne odpory, výsledkom čoho je generovanie tepla a jeho akumulácia v jednotlivých konštrukčných uzloch stroja. Vplyvom teplotnej rozťažnosti dochádza k chybe na špičke nástroja.

Vo všeobecnosti sú známe tri druhy vplyvov, ktoré ovplyvňujú pracovnú presnosť výrobných strojov. V nedávnom čase sme boli svedkami výrazného pokroku v oblasti statického a dynamického chovania strojov, a preto sa pozornosť obracia na teplotné účinky. Je známe, že 40 % až 70 % z celkovej výrobnéj nepresnosti je spôsobené teplotnými vplyvmi. Výsledkom zvýšeného záujmu o popis vplyvov tepla na výslednú presnosť stroja je aj vydanie normy ISO 230-3 v roku 2007 a tiež fakt, že teplotné chyby sa stali súčasťou preberacích skúšok. [6], [7], [8]

3.1. Zdroje teplotných chýb

Teplotné deformácie môžu byť zapríčinené viacerými faktormi. Všeobecne je možné rozdeliť zdroje tepla, ktoré majú vplyv na konečnú presnosť obrábacieho stroja na dve hlavné kategórie:

a) Externé zdroje tepla

Súvisia hlavne so zmenami prostredia, v ktorom je obrábací stroj umiestnený. Zmeny teploty okolia spôsobujú zmeny v teplotných gradientoch (vertikálnych, horizontálnych) a prispievajú tým k deformáciám stroja. Za teplotu okolia je považovaná teplota vo výrobnéj hale, kde sa daný stroj nachádza.

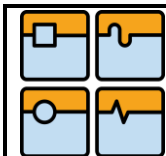
Teplotné podmienky v hale sa neustále menia. Rozsah teplôt závisí hlavne na geografickej polohe, na ročnom období a na aktuálnych podmienkach (prievan, iné stroje, ľudia...). Taktiež interné zdroje tepla menia podmienky okolitého vzduchu prostredníctvom radiácie. Výnimkou sú klimatizované haly, kde sú podmienky stále, ale prevádzková cena je neporovnateľne vyššia.

b) Interné zdroje tepla

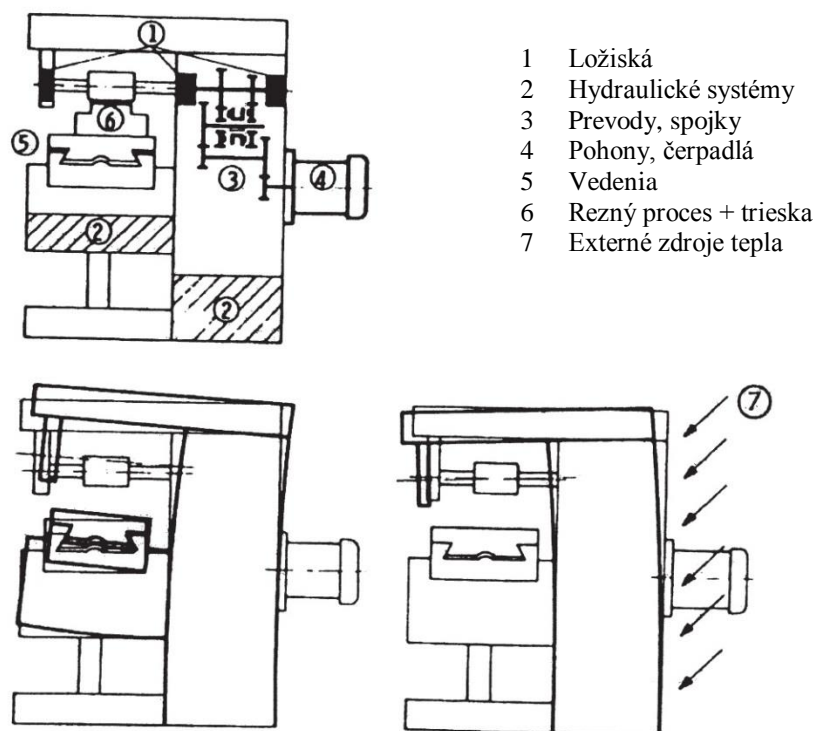
Sú v priamom spojení s konštrukciou stroja a spôsobujú deformácie, ktoré majú vplyv na zmenu relatívnej polohy nástroja voči obrobku. Závisia od typu stroja. Niektoré možné zdroje tepla:

- Ložiská
- Hydraulické systémy, prevodovky
- Prevody, spojky
- Pohony, čerpadlá
- Vedenia
- Rezný proces a triesky

[9], [10]



Obr. č. 3.1-1 Příklady zdrojů tepla na frézovacím stroji [10]



3.2. Rozdelenie teplotných chýb

Vo všeobecnosti je možné tieto chyby rozdeliť do dvoch základných skupín. Prvá zahŕňa chyby, ktoré sú funkciou teploty, ale nezávisia na vzájomnej polohe osí. Druhú skupinu tvoria chyby, ktoré sú závislé na teplote, ale zároveň aj na pozícii osí. Pre zjednodušenie problému a stanovenie vhodnej kompenzačnej techniky je užitočné definovať do ktorej kategórie spadá nežiaduca teplotná chyba.

- PITE – position independent thermal errors
- PDTE – position dependent thermal errors [10]

4. MERACIE TECHNIKY

4.1. Meranie teplotných deformácií

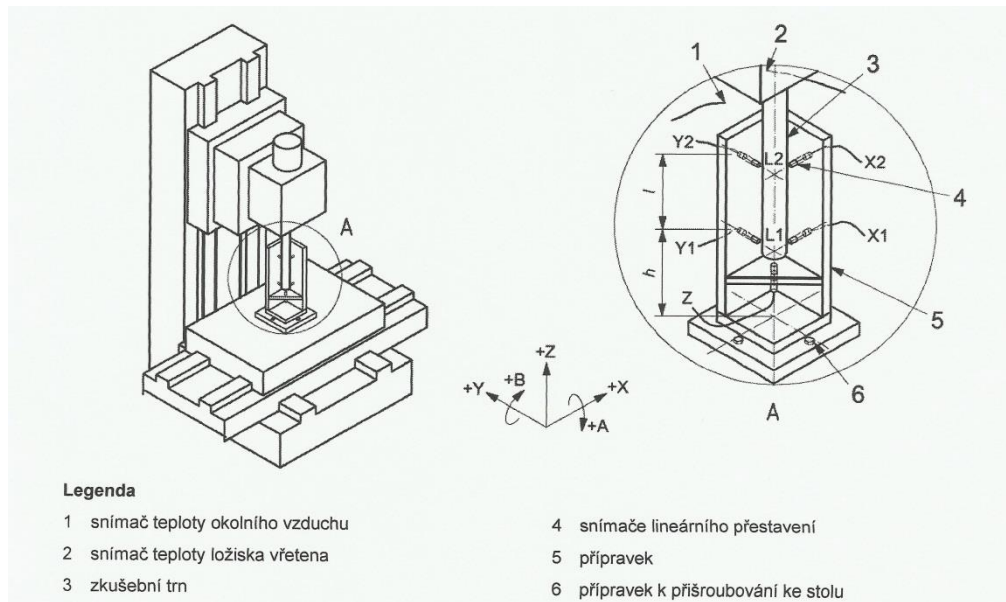
V súčasnosti existuje mnoho spôsobov merania posunutí a deformácií jednotlivých častí obrábacieho stroja. Nie všetky sú vhodné pre meranie teplotných chýb. Výber vhodnej meracej metódy závisí na zdroji chýb. Okolité prostredie spôsobuje malé zmeny teplôt, ale má vplyv na celú štruktúru stroja. Interné zdroje tepla spôsobujú lokálne deformácie, ktoré po sčítaní majú vplyv na výslednú presnosť stroja.

V posledných rokoch boli Medzinárodnou organizáciou pre štandardizáciu vydané normy, ktoré slúžia pre analýzy teplotného chovania obrábacích strojov:

- ISO 230 (teplotné deformácie u obrábacích strojov)
- ISO 10791-10 (teplotné deformácie obrábacích centier)
- ISO 13041-8 (teplotné deformácie sústružníckych strojov)

Tieto skúšky zahŕňajú vyhodnotenie teplotných chýb spôsobených zmenou teploty prostredia (ETVE – environmental temperature variation error), teplotných deformácií spôsobených otáčaním vretena a teplotných deformácií spôsobených pohybom lineárnych osí. Na obrázku č. 4.1-1 je zobrazené typické usporiadanie skúšky ETVE, tepelných deformácií spôsobených otáčaním vretena a pohybom v lineárnych osiach na obrábacom centre so zvislou osou vretena. Vo vretene je upnutý skúšobný trn a na doske je pripevnené zariadenie, ktoré obsahuje meracie prístroje posunutia a teploty.

Obr. č. 4.1-1 Typické usporiadanie skúšky pre obrábacie centrum so zvislou osou vretena [12]

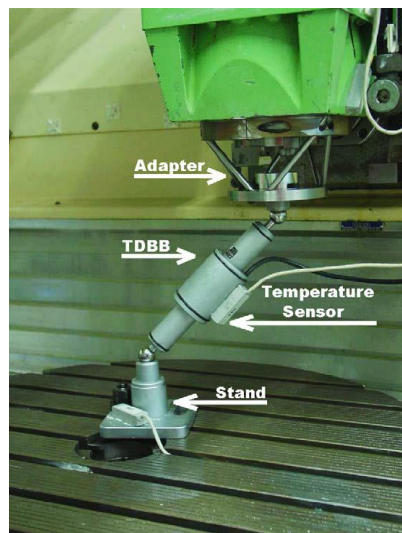


Pre meranie teplotných deformácií spôsobených pohybom lineárnych osí, musí byť meraná chyba v počiatočnom a koncovom bode celého rozsahu pohybu v danej osi. V prípade použitia laserového interferometru je možné merať vo viacerých bodoch pozdĺž osi.

Pre analýzy, ktoré skúmajú teplotné deformácie spôsobené otáčaním rotačných osí sa používajú dotykové snímače. Nevýhodou je, že pri meraní musí byť vreteno zastavené.

Častejšie sa preto používajú kapacitné alebo indukčné bezdotykové sondy. Posunutie na špičke nástroja sa meria pomocou dvojitého ballbaru. Princíp spočíva v umiestnení adaptéru na vreteno stroja (vreteno sa otáča) a následného merania odchýlky vo viacerých osiach.

Obr. č. 4.1-2 Meranie teplotných deformácií pomocou ballbaru u 5-osého centra [13]



Meranie teplotných deformácií je tiež možné pomocou dotykovej sondy. Využíva sa pri meraní medzi jednotlivými technologickými operáciami. Do vretena stroja sa namiesto nástroja upne sonda a na doske stroja sú väčšinou pripevnené referenčné body.

Pre určovanie deformácií rámu sa používajú tenzometre. Namerané deformácie sú použité pre určenie posunutí na špičke nástroja.

Meracie postupy uvedené v normách predpokladajú, že stroj je nezaťažovaný, prípadne pracuje pri dokončovacích podmienkach. Je možné zohľadniť vplyv obrobku napríklad pomocou hydraulického brzdy na vretene, ktorá simuluje moment z rezného procesu. [11]

4.2. Meranie volumetrickej presnosti

Pri odstraňovaní teplotných chýb pomocou kompenzácie (kapitola 6) je potrebné stroj volumetricky kalibrovať pri rôznych teplotných podmienkach, ktoré musia byť pri meraní časovo stále. Preto je potrebné uskutočniť meranie v minimálnom časovom úseku. V oblasti výrobnéj techniky sa v posledných rokoch úspešne využíva Laser Tracker. [11]

Obr. č. 4.2-1 Laser tracker [Faro]



4.3. Meranie teplôt

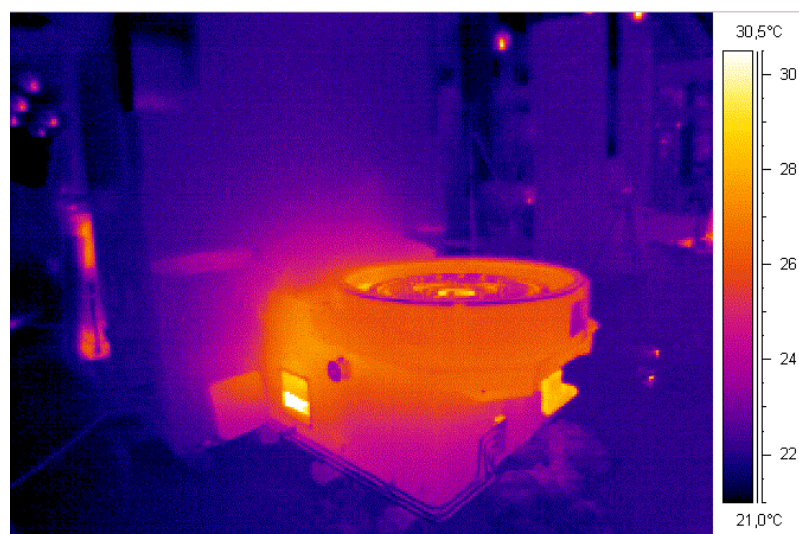
Pri meraní teploty sú najčastejšie využívané odporové teplomery. V minulosti na báze platiny pre ich výhodnú lineárnu charakteristiku. Dnes sa využívajú termoelektrické články a termistory (NTC / PTC).

Pre meranie teplotného rozloženia na povrchu častí priemyselných a stavebných objektov sú v súčasnosti používané infračervené kamery. Všetky telesá s teplotou vyššou ako 0K (absolútna nula) emitujú elektromagnetické vlny. S teplotou sa mení vlnová dĺžka. Infračervená kamera meria intenzitu infračerveného žiarenia na meranej ploche. Na základe tejto veličiny softvér počíta teplotu.

Obr. č. 4.3-1 Termografická kamera [Testo]



Obr. č. 4.3-2 Rozloženie teploty v lôžku karuselu [14]



5. URČOVANIE A KOMPENZÁCIA TEPLOTNÝCH CHÝB

5.1. Možnosti odstránenia teplotných chýb

Teplotné gradienty majú za následok deformácie stroja a spôsobujú odchýlky v priamosti, kruhovitosti a kolmosti pohybových osí. Cieľom je tieto odchýlky minimalizovať. Vo všeobecnosti je možné opatrenia voči teplotným chybám rozdeliť nasledovne:

a) Konštrukcia výrobného stroja, ktorá redukuje vplyv tepelného toku

Deformácia rámu obrábacieho stroja je nežiaduca, pretože cez nosnú štruktúru stroja sa teplotná chyba prenáša na nástroj. Preto je snahou využiť teplotne-symetrickú konštrukciu rámu. Jedná sa o také prevedenie, že v prípade deformácií vplyvom tepla dochádza k zmene rozmerov rámu, ale nemení sa geometrická presnosť jeho častí. Táto konštrukcia je uplatniteľná len u niektorých typov stroja. Väčšinou dochádza k minimalizácii deformácie v jednej obrábacej osi. Rám by mal byť tiež optimalizovaný tak, aby vznikali len lineárne zložky teplotných chýb, pretože uhlové zložky je komplikovanejšie kompenzovať. Často býva rám konštruovaný tak, aby mohol byť celý prefukovaný vzduchom, čo prispieva k chladeniu.

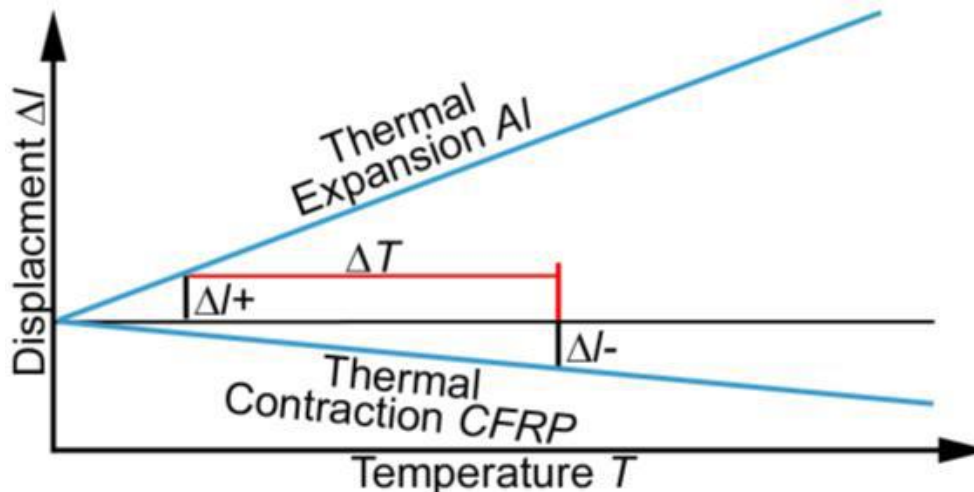
Ďalšou možnosťou zohľadniť teplotné deformácie v predvýrobnej fáze je izolovanie tepelných zdrojov, prípadne využitie nekonvenčných materiálov s nízkou teplotnou rozťažnosťou a tepelnou vodivosťou. Medzi takéto materiály patrí napr. vysokovýkonostný betón (HPC betón). Tento materiál má výborné vlastnosti z pohľadu teplotných deformácií a zároveň zachytáva vibrácie stroja. Nevýhodou je však cena a technologické hľadisko, pretože materiály tohto typu majú špecifické postupy pri montáži, samotnej výrobe, obrábaní.

Obr. č. 5.1-1 Lôžko zvislého sústruhu zhotovené z HPC betónu [Toshulin], [15]



Je možné tiež využiť materiály s negatívnym koeficientom teplotnej rozťažnosti. Jedná sa napríklad o plasty vystužené uhlíkovými vláknami. U týchto materiálov je potrebné uvažovať anizotropiu. Požadovaná vlastnosť negatívneho koeficientu existuje len v smere vlákien. Napríklad teplotnú chybu vzniknutú rozťažnosťou kovu je možné kompenzovať kontrakciou kompozitu. Na obrázku je zobrazená teplotná rozťažnosť hliníka v porovnaní s teplotnou kontrakciou plastu vystuženého uhlíkovými vláknami (CFRP – carbon fibre reinforced plastics)

Obr. č. 5.1-2 Materiál s pozitívnym (Al) a negatívnym (CFRP) koeficientom teplotnej rozťažnosti



Triesky dopadajúce na časti stroja sú zahriate vplyvom rezného procesu a majú tiež nežiaduce účinky na deformáciu. Preto moderné stroje bývajú vybavené automatickým dopravníkom triesok, ktorý ich okamžite odvádza mimo pracovný priestor. [6], [11]

b) Kontrola teplôt obrábacieho stroja a prostredia

Pozitívne ovplyvniť teplotné pomery na obrábacom stroji je možné najčastejšie pomocou chladiacich procesov. Využíva sa najmä aktívne chladenie. Chladené sú motory, guľčkové skrutky majú často vnútorné chladenie, zdroje tepla sú na stroji umiestnené tak, aby mohli byť obtekané chladiacim médiom.

V praxi je možné tiež nájsť prípady, kedy sú časti stroja zámerne ohrievané, aby sa znížili teplotné gradienty, ktoré prispievajú k deformácii. Využívajú sa mechanizmy pracujúce na princípe Peltierovho javu.

Pri výrobe presných súčastí je niekedy kladená požiadavka na stálu teplotu okolia, teda teplotu vo výrobných priestoroch. Tento proces má za cieľ znížiť negatívny dopad meniacich sa podmienok voľnej, prípadne nútenej konvekcie v okolí stroja. Haly musia byť klimatizované na konštantnú hodnotu teploty vo všetkých smeroch. [6], [11]

c) Kompenzácia teplotných chýb

Ak aj napriek uplatneniu princípov popísaných v predchádzajúcich dvoch bodoch dochádza k nežiaducim hodnotám deformácie na špičke nástroja, potom je nutné použiť kompenzáciu. Je potrebné si tiež uvedomiť, že konštrukčné opatrenia zvyšujú cenu stroja, čo väčšinou znižuje hodnotu v očiach zákazníka. Kompenzácia ponúka cenovo výhodnejšiu variantu odstránenia chýb. Kompenzácie sa delia na dve základné skupiny: [8]

- **Priama kompenzácia** – odchýlky od žiadanej hodnoty sú prerušované merané a následne sú korigované posunutia v jednotlivých smeroch. Nevýhodou je prerušovanie procesu za účelom merania.

- **Nepriama kompenzácia** – na základe merania sú vytvorené matematické modely, ktoré predikujú nežiaduce stavy a následne riadiaci systém zavádza potrebné korekcie.

5.2. Softvérová kompenzácia

Jedná sa v podstate o nepriamu kompenzáciu. Výhodou je, že stroj nie je nutné vybaviť špeciálnymi prídavnými sondami. Tento typ predstavuje lacný spôsob minimalizácie teplotných deformácií. Vo fáze prototypových skúšok je stroj vystavený dôkladnému meraniu a simuláciám štandardných a neštandardných stavov. Na základe týchto meraní je vytvorený matematický model, ktorý odovzdáva informácie riadiacemu systému. V praxi sú využívané nasledujúce typy modelov.

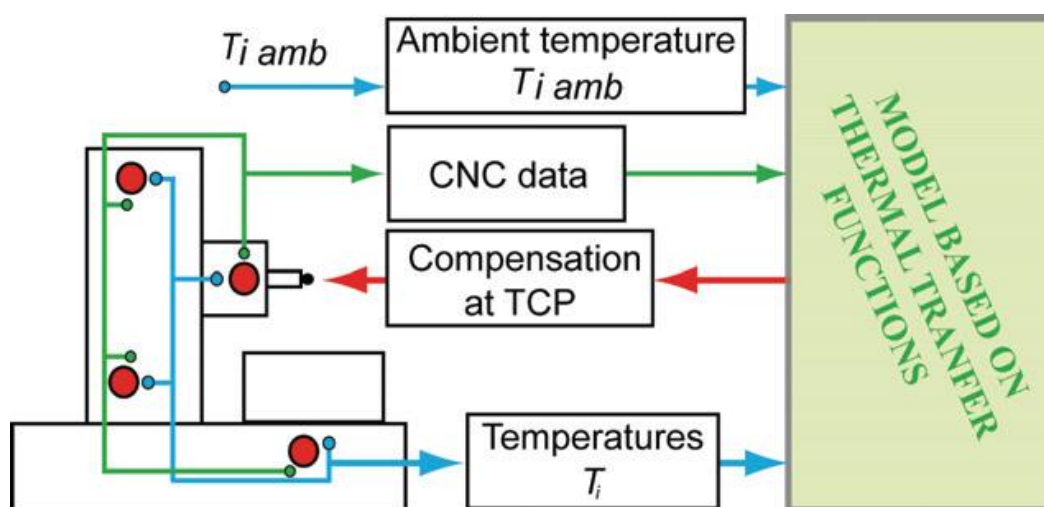
5.2.1. Viacnásobná lineárna regresia

Tento typ analýzy je známy aj pod pojmom MLR (z angl. multiple linear regression). Jedná sa o matematický popis spravidla vo forme polynómu. Výhodou je, že kompenzačný algoritmus je získaný pomerne rýchlo, pretože merania sú často zostavené len na základe jedného merania. Usporiadanie a prevedenie merania je väčšinou realizovaný podobne ako skúška ISO 230-3 pre vyhodnocovanie teplotných deformácií spôsobených otáčaním vretena. Tento typ analýzy je navyše uskutočňovaný pri konštantných otáčkach vretena bez pohybu ďalších osí a bez zahrnutia vplyvu obrábania. Tento stav teda neodpovedá presne realite. Čas tvorby modelu MLR je krátky, ale presnosť a spoľahlivosť odchýlok je nízka. Je to zapríčinené tým, že chýbajú informácie o teplotách z miest, kde nie sú teplotné senzory. [7]

5.2.2. Prenosová funkcia

Fyzikálne systémy môžu byť popísané pomocou prenosovej funkcie. Princíp spočíva v buzení resp. odozvy systému. V prípade teplotnej kompenzácie prenosová funkcia popisuje väzbu medzi teplotou v určitom mieste a výchylkou v inom bode (špička nástroja). Obdobne ako MLR modely využívajú tieto modely informácie o teplote zaznamenané na konštrukcii stroja. Výhodou je, že umiestnenie senzorov je jednoznačné, senzor je treba umiestniť čo najbližšie k zdroju tepla. Tiež je možné využiť interné dáta z riadiaceho systému. [7], [8]

Obr. č. 5.2-1 Schéma nepriamej kompenzácie založená na prenosovej funkcii [8]



5.2.3. Ďalšie systémy vytvárania modelov

V oblasti výskumov existuje ďalšia rada možností vytvorenia modelov, ktoré slúžia pre kompenzáciu nepresností spôsobených javom teplotnej rozťažnosti. Patrí sem napríklad

využitie neurónových sietí, fuzzy logiky, Bayesovské siete a iné. Tieto typy sú skôr záležitosťou vedeckých inštitúcií ako praxe.

5.3. Numerické modelovanie teplotných chýb

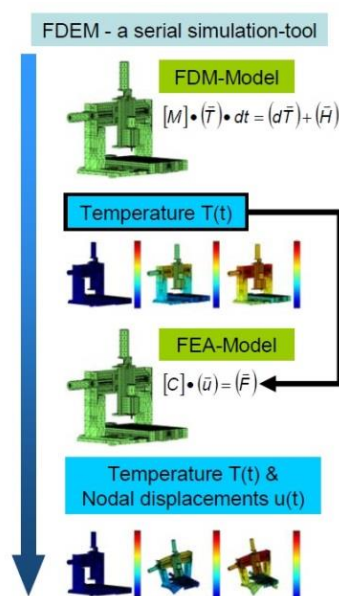
V minulosti nebolo možné presne identifikovať a následne redukovať teplotné chyby. Výskumy v danej oblasti sa výrazne zefektívnili s rozvojom Metódy konečných prvkov a výkonnej počítačovej techniky. MKP umožňuje hĺbkové analýzy, ktoré skúmajú tepelné chovanie stroja, ktorý je ovplyvnený zdrojmi tepla a prostredím, v ktorom je umiestnený. V súčasnosti je snaha o vytvorenie modelov, ktoré budú zohľadňovať obrábacie podmienky a tiež teplotu okolia. Veľmi často je žiaduce uskutočniť experimenty, ktoré vierohodnosť modelu potvrdia, prípadne umožnia doladiť model.

Modelovanie teplotných chýb za účelom zvýšenia efektivity obrábacieho procesu sa stalo možným až vďaka rozvoju výkonných počítačov a zefektívnenia výpočtových algoritmov. V súčasnosti sú k dispozícii dva nástroje pre numerické výpočty deformácií obrábacích strojov, ktoré súvisia s generovaným teplom:

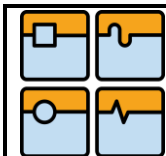
- Metóda konečných diferencií (FDM – Finite Difference Method)
- Metóda konečných prvkov (FEM – Finite Element Method, niekedy FEA)

Využíva sa kombinácia týchto dvoch algoritmov (FDEM). Je to silný nástroj pre výpočet nestacionárneho, teplotne-pružného chovania systému, napr. obrábacieho stroja. V prvom kroku je pomocou FDM určené rozloženie teploty v analyzovanom systéme. V prípade nestacionárnej simulácie sú teploty vyhodnotené v diskrétnych časových okamžikoch. Nasleduje analýza na báze FEM, ktorá určí vzniknuté deformácie.

Obr. č. 5.3-1 Schéma metódy FDEM



Napriek tomu, že v čase vzniku bola metóda FDEM silným nástrojom, má určité nevýhody. Nie je tu možnosť rýchlej, automatickej diskretizácie telesa, je obmedzená počtom a rozmanitosťou elementov. Preto je vytlačaná modernými komerčnými softvérmi na princípe FEM. Tie odstraňujú spomínané nedostatky a vďaka ich rýchlym solverom sú atraktívne pre užívateľov. Softvéry obsahujú množstvo modulov, ktoré umožňujú riešiť rôzne fyzikálne



úlohy. Sú to napr. moduly pre riešenie prúdenia tekutín (CFD), nástroje pre lineárne a nelineárne úlohy statické, dynamické, kontaktné úlohy a iné. Nevýhodou komerčných produktov je slabá podpora vytvárania geometrických modelov, preto sa najčastejšie využíva špecializovaný CAD systém a geometria je následne importovaná do MKP programu.

Výpočtové modely založené na MKP majú nevýhodu, že na rozdiel od iných druhov modelovania nedokážu simulovať reálne pracovné podmienky stroja. Z toho dôvodu sa využívajú predovšetkým na:

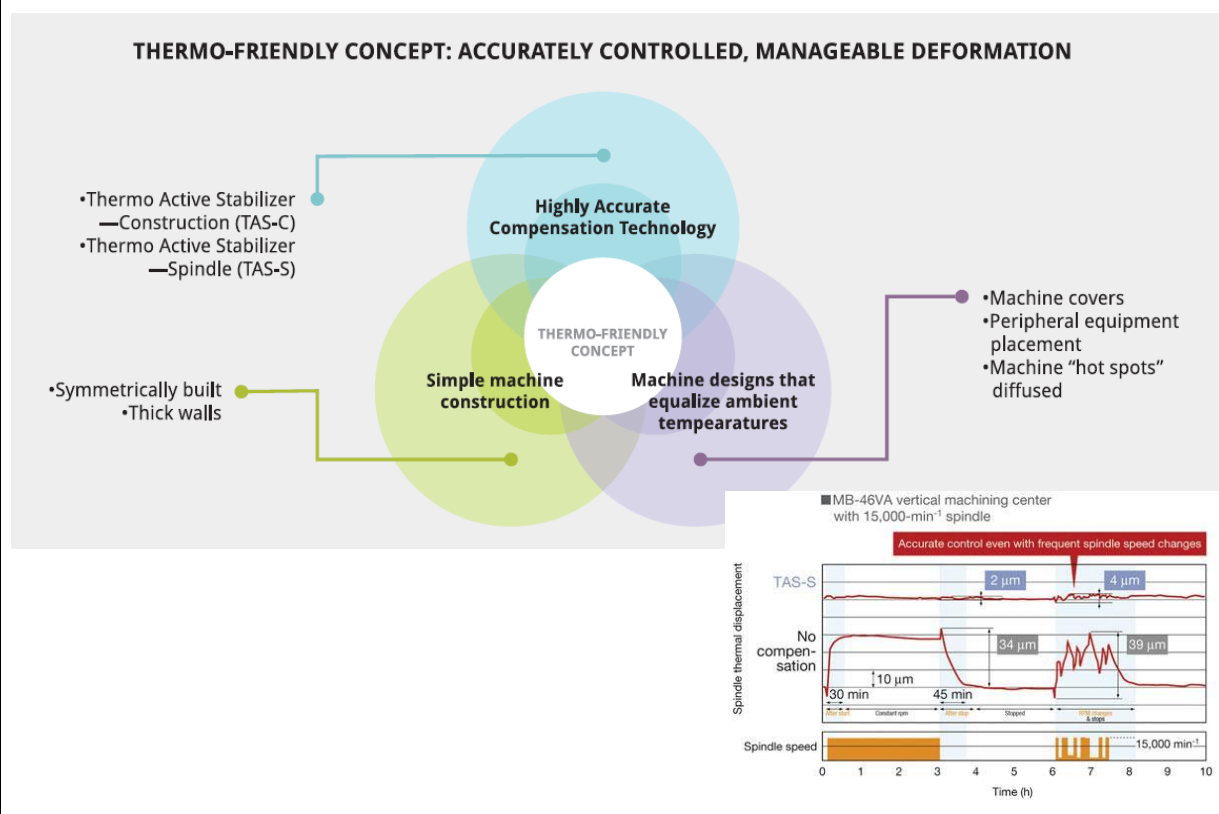
- optimalizáciu systému
- predikciu systému, ktorý je v návrhovej fáze
- analýzu aktuálneho systému [11]

V dostupných zdrojoch sa uvádza, že MKP nie je príliš vhodnou metódou pre vytvorenie modelu a následne použitie nepriamej kompenzácie. Osobne si myslím že je možné využitie tejto metódy pri strojoch s väčšou opakovateľnosťou, prípadne pri robustných strojoch, kde sa nepresnosti pohybujú vo vyšších rádoch ako u precíznych centier.

5.4. Okuma Thermo-Friendly Concept

Samostatná kapitola je venovaná koncepcii spoločnosti Okuma, ktorá patrí k tým najlepším dostupným na trhu s obrábacími strojmi. Táto koncepcia spája optimálnu štruktúru stroja spolu so systémom TAS-C. Ten spočíva v inteligentnom riadení, ktoré zbiera informácie z teplotných snímačov a navyše dokáže predpovedať tepelnú záťaž od vretena a pohonov. Tieto informácie sú použité pre kompenzáciu chýb. V systéme sú zahrnuté podmienky okolia a vplyv prerušenia práce na stroji. [Okuma]

Obr. č. 5.4-1 Systém Okuma Thermo-Friendly Concept a vplyv systému TAS na presnosť vretena



6. TEÓRIA MODELOVANIA [16]

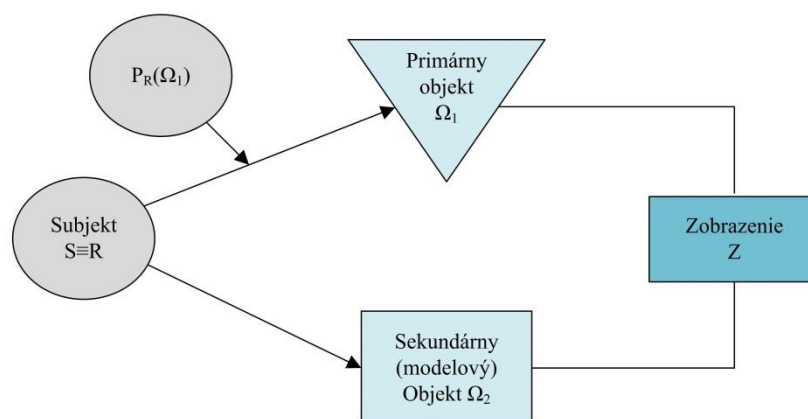
Slovo model má pôvod v latinčine: modus = miera, mierka. Pôvodne bol tento pojem používaný v stavebníctve a vyjadroval mieru, ktorá určovala proporcie stavby. Postupom času sa tento pojem rozšíril do rôznych oblastí. Dnes sú slovom model označované módné výtvary, hračky (modely lietadiel, železníc), predlohy pre umelecké diela, objekty pre výrobu foriem v zlievarenstve, geometrické zväčšeniny alebo zmenšeniny technických objektov. Ako modely sú tiež označované pomocné objekty, ktoré slúžia k riešeniu problémov na objektoch Ω pomocou rôzneho druhu modelovania. Tieto modely sú označované ako modelové objekty O_M .

6.1. Základné atribúty modelovania

I. Modelovanie je sústavou, ktorej štruktúra sa skladá z nasledujúcich prvkov:

- **Subjekt S** – skupina ľudí, ktorá realizuje činnosti s modelom, niekedy aj riešiteľ, $S \equiv R$
- **Primárny objekt Ω_1** – objekt záujmu subjektu, rieši na ňom problémy
- **Činnosť subjektu S s objektom Ω_1** – riešiteľ R rieši problém P na objekte Ω_1 , označujeme $P_R(\Omega_1)$
- **Sekundárny objekt Ω_2** – subjektom vytvorený pomocný (modelový) objekt
- **Zobrazenie Z** – priradenie vlastností medzi primárnym a sekundárnym objektom

Obr. č. 6.1-1 Prvky štruktúry modelovania



II. Nutnou podmienkou modelovania je existencia modelového objektu

Modelový objekt OM je pomocný objekt, ktorý je nutný k riešeniu problému modelovaním. Podľa charakteru modelu sa modelovanie člení na tieto typy:

- Modelovanie intuitívne (abstraktné)
- Modelovanie materiálne – model je materiálny objekt, modelovanie spojené s realizáciou experimentu
- Modelovanie abstraktné – model predstavuje abstraktný objekt v podobe:
 - Sústavy informácií či dát (dátové modelovanie)
 - Množiny matematických teórií (výpočtové modelovanie)

- Systavy znalostí (znalostné modelovanie)
- Formálnych štruktúr (formálne modelovanie)
- Modelovanie hybridné – modelovým objektom je prienik materiálneho a abstraktného modelového objektu

III. Model je modelom vtedy, ak je prostriedkom k riešeniu problému

Model je vymedzený ako sústava, ktorej základným prvkom je modelový objekt O_M . Ak modelový objekt existuje, ale má také vlastnosti, že s ním nie je možné realizovať činnosti potrebné pre vyriešenie problému, potom sa nejedná o model. Jedná sa o tzv. hypotetický model.

IV. Modelovanie je súbor činností realizovaných na modeli s cieľom vyriešiť problém

Charakter činností závisí na type modelovania

V. Podstatnou činnosťou v modelovaní je priradenie vlastností medzi objektmi

Jedná sa o priradenie vlastností medzi primárnym objektom Ω_1 a sekundárnym objektom Ω_2 . Pre toto priradenie sa používa pojem zobrazenie a rozoznávame:

- Intuitívne priradenie
- Prirodzené priradenie
- Vedeckotechnické priradenie
- Systémové priradenie

VI. Významnú úlohu v modelovaní majú určité typy podobností

Pri modelovaní je možné určiť tieto významné typy podobností:

- Podobnosť z hľadiska záujmu subjektu
- Fyzikálna podobnosť
- Matematická podobnosť
- Analógia
- Podobnosť
- Identita

6.2. Zovšeobecnená štruktúra modelu

„Model je prostriedkom k riešeniu konkrétneho, riešiteľom R vymedzeného problému $P_R(\Omega)$ na primárnom objekte Ω_1 “

Zovšeobecnená štruktúra modelu M , vytvorená riešiteľom R pre riešenie problému $P_R(\Omega)$ na objekte Ω je táto aktívna abstraktná sústava:

$$M(R, \Omega, P) = [\Sigma(\Omega), O_M, \Sigma(O_M), Z, MR, mSW, mHW]$$

- $\Sigma(\Omega)$ systém podstatných veličín vytvorených na objekt Ω pri riešení problému $P_R(\Omega)$
- O_M modelový objekt, ktorý súvisí s modelovaním

- $\Sigma(O_M)$ systém veličín vytvorený na O_M z hľadiska problému $P_R(\Omega)$
- Z izomorfné zobrazenie medzi systémami veličín $\Sigma(\Omega)$, $\Sigma(O_M)$
- MR metóda riešenia problému $P_R(\Omega)$
- mSW modelový software
- mHW modelový hardware

6.3. Výpočtové modelovanie

V [16] je možné nájsť kapitolu o vymedzení typov modelovania. Jeden z typov pojednáva o abstraktnom modelovaní, kedy je za modelový objekt považovaný abstraktný objekt. Na obecnej úrovni sa môže jednať o akúkoľvek sústavu informácií.

Do kategórie abstraktného modelovania spadá aj výpočtové modelovanie. Nadväzuje na teoretické modelovanie, kde modelovým objektom je teória. Ak je táto teória matematická, potom teoretické modelovanie prechádza do výpočtového, ktoré je v [16] definované:

„Modelovým objektom O_M u výpočtového modelovania je množina matematických teórií teórie $M[\tau_m(\Omega)]$ “

Štruktúra klasického výpočtového modelovania obsahuje tieto prvky:

- Formuláciu odborového problému $P(\Omega)$
- Vytvorenie systému relevantných veličín na $\Sigma(\Omega)$ na (Ω) vo vzťahu k $P(\Omega)$
- Vytvorenie čiastkových modelov M_i
- Vytvorenie čiastkových systémov veličín $\Sigma(\Omega)_i$ pre jednotlivé čiastkové modely
- Výber matematickej teórie τ_Ω súvisiacej so systémom veličín
- Výber metódy riešenia
- Vytvorenie a odladenie odpovedajúceho výpočtového algoritmu A_v
- Vytvorenie množiny vstupných údajov do výpočtového algoritmu
- Výber výpočtových prostriedkov (počítač)
- Proces realizácie výpočtového algoritmu
- Spracovanie výsledkov riešenia
- Analýza výsledkov riešenia
- Overenie pravdivosti výsledkov výpočtového modelovania
- Syntéza dosiahnutých výsledkov riešenia do databázy znalostí

7. RÁM ZISLÉHO SÚSTRUŽNÍCKEHO CENTRA

V tej časti začína riešenie praktického problému. Vzhľadom k tomu, že sa jedná o komplexný problém, bude v ďalších krokoch využitý systémový prístup riešenia problémových situácií, ktorý dáva čitateľovi názorný prehľad o použitých postupoch a tiež poskytuje obraz o entitách, ktoré autor považoval za dôležité, a ktoré naopak boli na danej úrovni nepodstatné. Postup a jednotlivé kroky boli čerpané z [16]

7.1. Analýza problému $P(\Omega)$

1. Vstupná analýza problémovej situácie

Problém bol zadáný spoločnosťou Toshulin ako diplomová práca. Daná problematika je aktuálna, pretože súvisí so strojom, ktorý je vo výrobnéj fáze. V práci budú použité určité zjednodušenia, aby práca náročnosťou spĺňala kritéria diplomovej práce.

2. Formulácia problému

Zadanie diplomovej práce je veľmi obecné. Konkrétne zadanie, muselo byť prispôsobené na základe požiadaviek vedúceho práce, teda zadávateľa problému. Taktiež je na tomto mieste dôležité spomenúť, že rozsah riešenia a použitých metód bol výrazne závislý od množstva poskytnutých údajov spoločnosťou Toshulin. Preto so súhlasom vedúceho práce je možné problémovú situáciu formulovať nasledovne:

Cieľom práce je zoznámiť sa s problematikou teplotných deformácií u výrobných strojov, obzvlášť u zvislých sústružníckych centier. Následne na základe poskytnutej geometrie je v praktickej časti úlohou vytvoriť výpočtový model, ktorý bude slúžiť k určovaniu teplotných polí a teplotných deformácií. Výpočet bude realizovaný na stroji z rady Forceturn. Okrajové podmienky budú vychádzať z experimentálnych metód. K numerickým výpočtom bude použitá Metóda konečných prvkov a softvér ANSYS. Neoddeliteľnou súčasťou je návrh a popísanie metodického prístupu k riešeniu.

Obr. č. 7.1-1 Zvislé sústružnícke centrum Forceturn



3. Formulácia cieľov pri riešení problému

Ciele práce sa menili v priebehu riešenia problému a s postupným získavaním potrebných dát. Konečné požiadavky na cieľ diplomovej práce je možné stanoviť nasledovne:

- Zostavenie výpočtového modelu rámu sústruhu
- Výpočet teplotných polí a teplotných deformácií pre zvolené hodnoty
- Popísanie využiteľnosti modelu v praxi

4. Analýza nadradených reštrikcií

Vzhľadom k tomu, že sa jedná o samostatnú prácu na školskej úrovni neboli definované žiadne výrazné obmedzenia. Jedinou obmedzujúcou okolnosťou je zverejňovanie niektorých interných, citlivých informácií v práci, preto po dohode s kompetentnými boli tieto problémy vyriešené. Taktiež musí byť rozsah riešenia a zložitosť modelu prispôbený výpočtovému prostriedku, na ktorom bude problém riešený.

5. Analýza možností využitia informačných zdrojov

Existenciu riešenia obdobného problému som zaznamenal len pre menšie obrábacie centrá, ale postup a použité metódy je možné využiť. V zadaní je uvedená metóda riešenia s využitím MKP. Táto matematická teória spolu s vhodným hardvérom a softvérom je pre daný problém použiteľná. Je namieste zhodnotiť, že informačné zdroje sú pre riešenie problému dostatočné.

6. Analýza stupňa ostrosti problému

7. Vymedzenie hraníc problému

Hore uvedené dva body nebudem na tomto mieste ďalej rozvádzať, pretože bude o nich istým spôsobom pojednávané v nasledujúcich kapitolách, opäť najmä pri určovaní systému podstatných veličín, kde si bude môcť čitateľ veľmi jednoducho vytvoriť obraz o stupni ostrosti, resp. o hraniciach problému.

8. Analýza stupňa naliehavosti riešenia problému

V úvodných kapitolách práce bolo pojednávané o aktuálnej situácii a aktuálnych prístupoch v oblasti teplotných deformácií obrábacích strojov. Táto problematika je stále predmetom výskumu u mnohých organizácií a jedná sa o zložité procesy najmä u takých rozmerných strojov, akými sú zvislé sústružnícke centrá. Spoločnosť Toshulin v bežnej praxi obdobné analýzy nepoužíva, pretože to nie je vyžadované zákazníkmi. Z toho dôvodu sa jedná len o určitý experiment v rámci školského zadania, ktorý má časovú ohraničenosť vymedzenú len stanoveným termínom odovzdania práce.

9. Analýza možných kooperácií

Z pochopiteľných príčin pri riešení daného problému nie je možná výrazná spolupráca, na určitej úrovni boli niektoré dosiahnuté výsledky konzultované s kompetentnými zamestnancami firmy Toshulin.

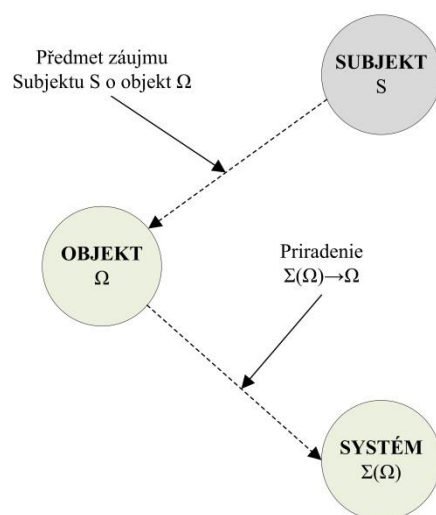
10. Analýza možností overenia správnosti riešenia

V riešenej problematike sú z praxe známe prostriedky, ktoré slúžia na overenie dosiahnutých výsledkov. Jedná sa výlučne o experimentálne metódy. Obecne už bolo o niektorých meracích metódach pojednávané v kapitole 4.

7.2. Jednotný scenár riešenia problémov

Základom riešenia problému je vytvorenie systému podstatných veličín $\Sigma(\Omega)$ na entite Ω . Schematicky je tento systém znázornený na obr. č. 7.2-1

Obr. č. 7.2-1 Schéma vytvárania systému podstatných veličín



7.3. Vytváranie systému podstatných veličín

Cieľom tejto kapitoly je vytvorenie systému veličín $\Sigma(\Omega)$ na entite Ω . Za entitu bude považovaný rám stroja. Systém podstatných veličín pozostáva z prvkov podmnožiny:

- a) **Podmnožina S_0** – obsahuje veličiny v_0 , popisujúce okolie entity, sú to tzv. environmentálne veličiny

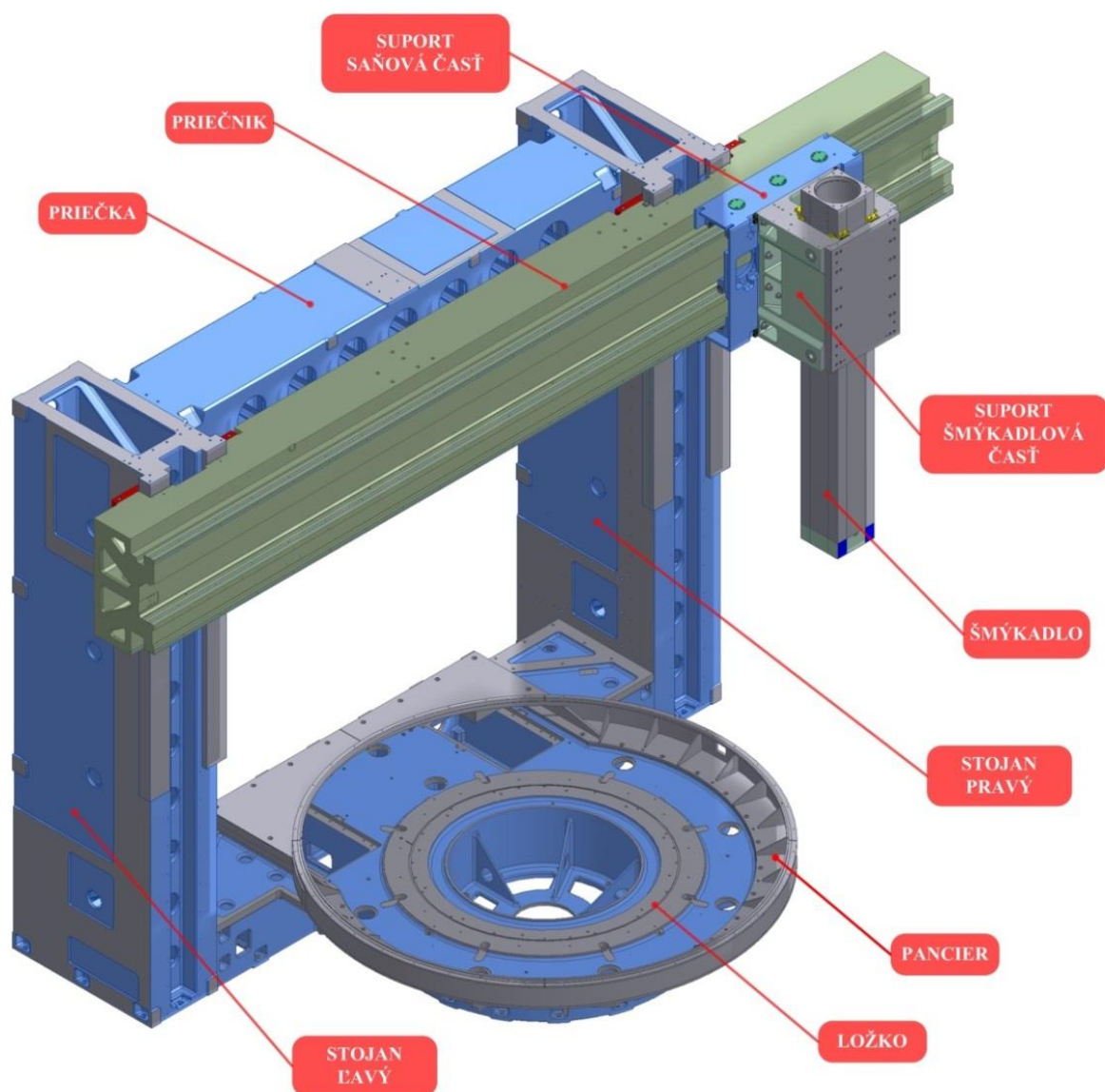
Za environmentálne prostredie je možné považovať vzduch, ktorý obklopuje rám, v termodynamike definovaný ako tekutina (kontinuum). Vzduch v okolí má zásadný vplyv na prestup tepla (konvekciu) medzi rámom a okolitým prostredím a tiež na radiáciu tepla do okolia.

Dané veličiny je však v oblasti výrobných strojov problém kvantifikovať, pretože podmienky sa neustále menia. Napríklad teploty v pracovnom priestore závisia od rôznych faktorov – teplo generované pri obrábaní (závisí na technologickej operácii), množstvo triesok dopadajúce na dno pracovného priestoru (prípadne na dopravník triesok), teplota chladiacej kvapaliny a iné. Teplota okolitého vzduchu sa tiež mení v časti stroja, kde sú umiestnené motory, hydraulické rozvody, chladničky a iné prídavné zariadenia. Inými slovami, teplota okolia je výrazne ovplyvňovaná krytovaním stroja, ktorý rozdeľuje okolitý priestor rámu na viaceré časti, každú s inými teplotnými vlastnosťami.

b) Podmnožina S1 – obsahuje veličiny v_1 , které popisují strukturu a topologii entity, geometrii prvků

Geometria rámu sústružníckeho centra Forceturn bola dodaná spoločnosťou Toshulin v elektronickej podobe. Na obr. 7.3-1 sú pomenované jednotlivé konštrukčné skupiny. Z obrázku je zrejmé, že rám ako entita Ω sa skladá z viacerých podobjektov, ktoré sú navzájom prepojené zatiaľ bližšie nešpecifikovanými väzbami. Objekt je v aktuálnej fáze pomenovaný ako geometrický model. Bude základným podkladom pre tvorbu výpočtového modelu.

Obr. č. 7.3-1 Geometrický model sústružníckeho centra Forceturn



- c) **Podmnožina S2** – obsahuje veličiny v_2 , ktoré popisujú podstatné väzby entity s okolím, resp. väzby medzi jednotlivými podobjektami, na ktoré je entita rozdelená

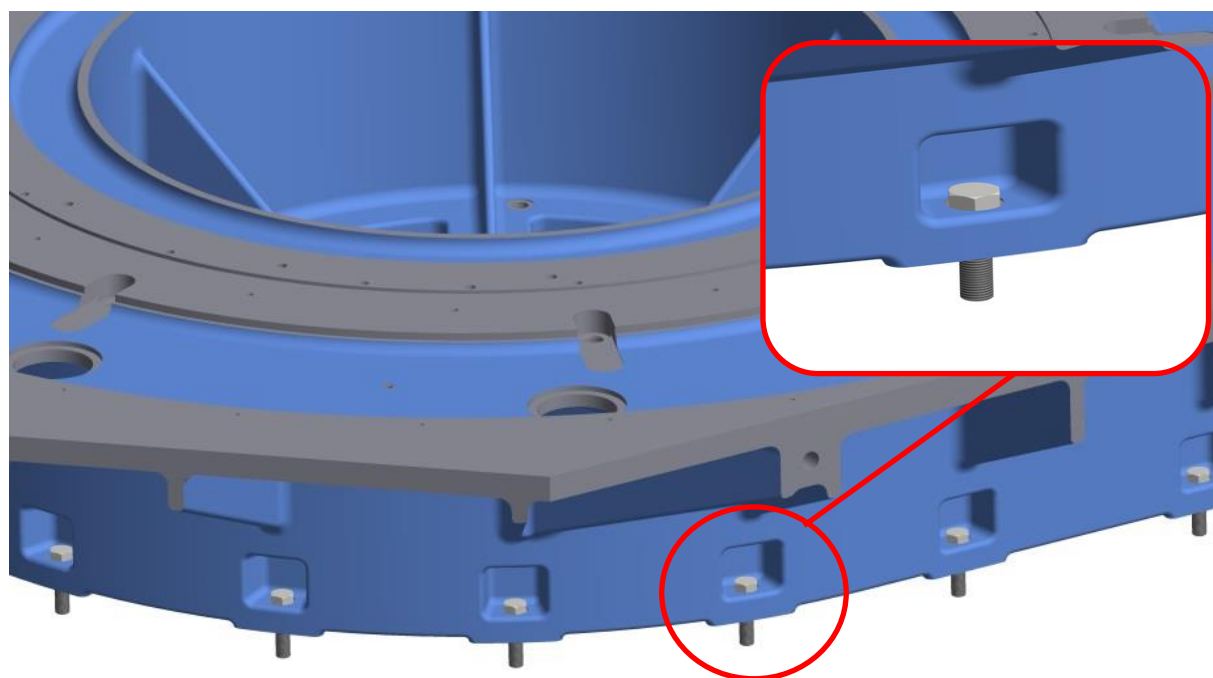
Rám stroja je upevnený na základ pomocou kotiev. Na obr. č. 7.3-2 sú zobrazené otvory pre kotviace prvky na lôžku spolu so skrutkou kotvy. Tento spôsob uloženia je zo statického hľadiska možné uvažovať ako votknutie v daných bodoch skrutkového spoja. To znamená, že skrutka zamedzuje pohybu rámu v jednotlivých bodoch vo všetkých smeroch súradnicového systému. Z hľadiska pevnostných analýz bude nasledovný predpoklad:

- *skrutkový spoj bude uvažovaný dokonale tuhý (tzn. nie je uvažovaná žiadna vôľa v spoji a skrutka sa nedeformuje)*

Poznámka:

Rám stroja je uložený na pätkách (ložko), resp. na spodnej ploche stojanu. Vo výpočte nie je možné uvažovať zjednodušenie votknutia v priamo na ploche pätky, resp. stojanu. Obzvlášť u stojanu by sa výrazne zmenila tuhosť.

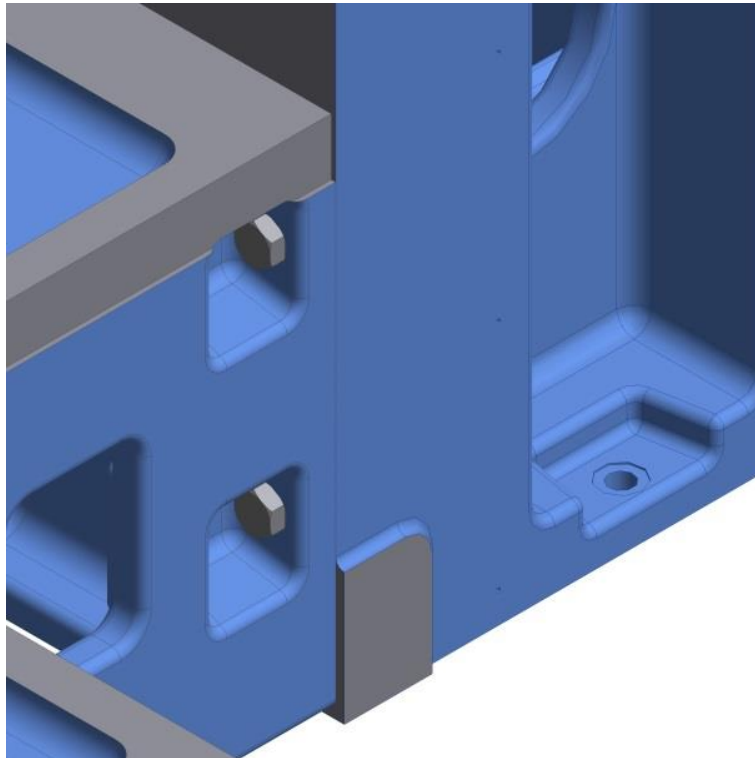
Obr. č. 7.3-2 Pohľad na konštrukčné riešenie dier spolu so skrutkou kotvy



Lôžko a podobne aj horná priečka sú pripevnené k oboj stojanom pomocou skrutkového spoja, pomocou skrutky a závit v protikuse. Tiež oba postranné uholníky sú pripevnené k rámu týmto spôsobom. Preto je možné uskutočniť nasledujúci predpoklad:

- *lôžko, pravý stojan, ľavý stojan, priečka a postranné uholníky sú navzájom spojené dokonale tuhými skrutkovými spoji*
- *spoje zamedzujú pohybu v spojených bodoch, ale aj na celej ploche styku vo všetkých osiach súradnicového systému) \Rightarrow tieto časti sa budú z hľadiska statiky chovať ako jeden celok*

Obr. č. 7.3-3 Spojenie lôžka so stojanom

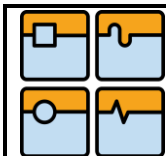


V predchádzajúcej časti podmnožiny boli uvedené časti rámu, ktoré je možné nazvať ako nepohyblivé, pretože sú permanentne v pevnom spojení. Ostatné časti je možné nazvať ako pohyblivé, pretože vzájomnými pohybmi určujú polohu špičky nástroja, ktorý následne dáva obrobku požadovaný tvar. V niektorej literatúre (napr. [15]) je zobrazený rám zvislého sústruhu ako sústava lôžko – stojan (prípadne dva stojany) – spojovacia priečka (prípadne priečnik).

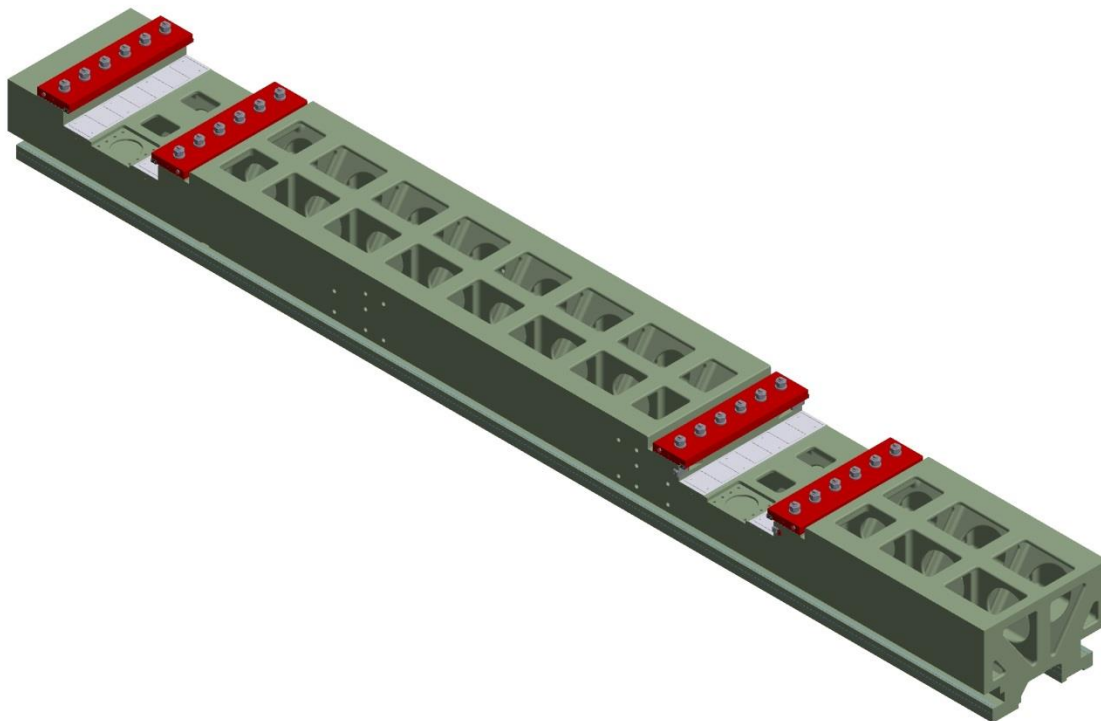
Lineárne vedenia pohyblivých častí sú väčšinou kombináciou hydrostatických vedení a valivých hniezd. Z hľadiska modelovania je tieto prvky náročné zahrnúť v celom rozsahu do analýz, pretože sa jedná o zložitý systém väzieb, vedenia navyše majú určitú poddajnosť. Preto v ďalšom texte budú popísané jednotlivé pohyblivé členy a ich uloženie (väzby), ale pre tvorbu výpočtového modelu budú splnené nasledujúce predpoklady:

- *Všetky vedenia (valivé, hydrostatické) budú považované za dokonale tuhé*
- *Model bude reprezentovať stroj, ktorý sa bude nachádzať v určitej zvolenej konfigurácii a bude uvažovaný ako dokonale tuhý celok*

Prvým konštrukčným uzlom je priečnik, ktorý je v interakcii s oboma stojanmi a pohybuje sa po ráme zvisle nahor, resp. nadol. Táto riadená os sa nazýva os Q. Priečnik je uložený na pravom stojane pomocou kombinácie valivého a hydrostatického uloženia, na ľavom stojane len hydrostaticky. Zvislý pohyb je vyvedený cez guľčkovú skrutku pomocou motora so samosvornou prevodovkou.

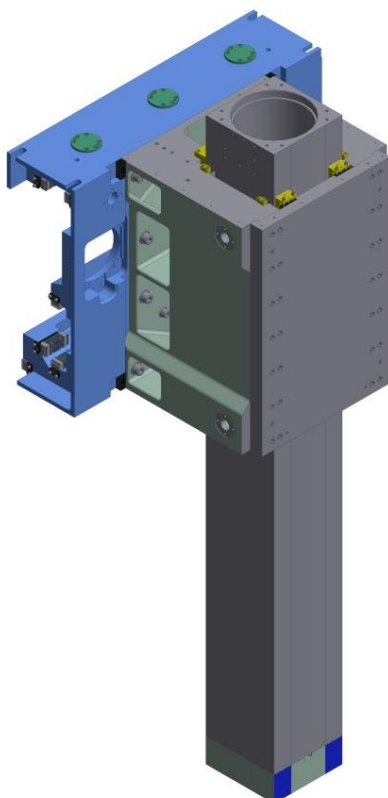


Obr. č. 7.3-4 Priečník



Ďalšou časťou, ktorá teoreticky už nepatrí k rámu stroja, je suport spolu so šmýkadlom. Suport je rozdelený na saňovú a šmýkadlovú časť.

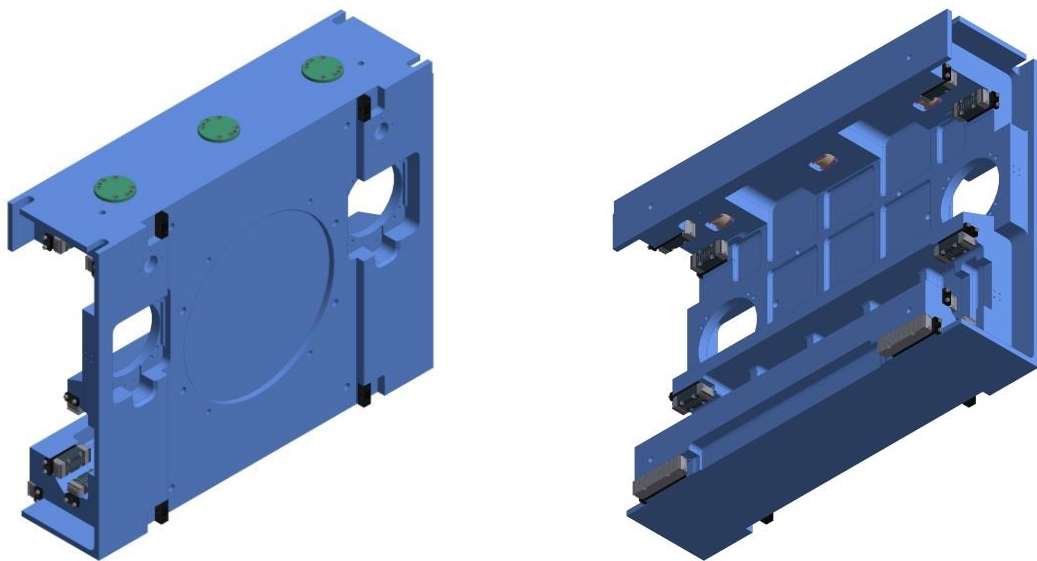
Obr. č. 7.3-5 Suport so šmýkadlom



Suport – saňová část

Saňová část suportu zabezpečuje pohyb v osi X. Bezvôľový pojazd je zabezpečený pomocou systému masterslave od spoločnosti Wittenstein Alpha. Lineárne vedenie je riešené pomocou valivých vedení od spoločnosti INA.

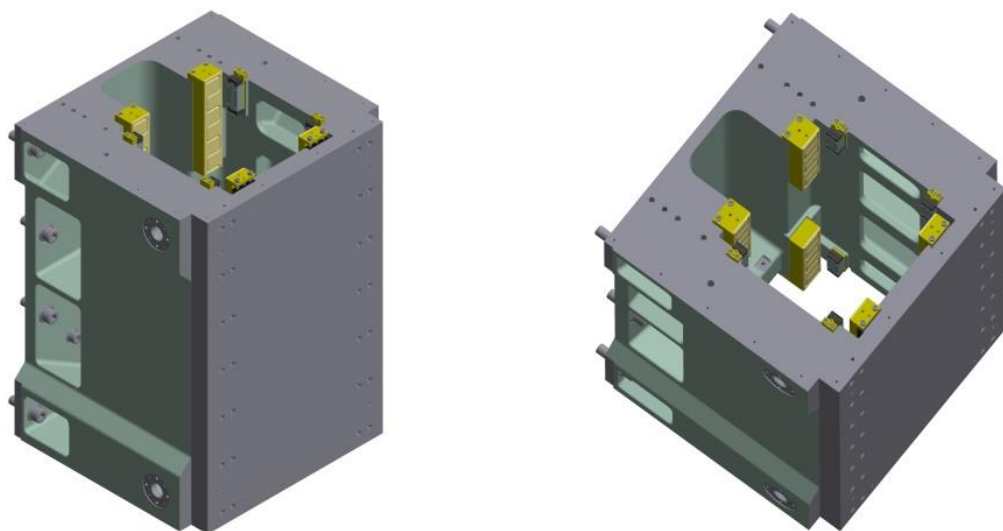
Obr. č. 7.3-6 Saňová část suportu spolu s usporiadaním valivých elementov



Suport – šmýkadlová část so šmýkadlom

Šmýkadlová část suportu slúži na uloženie a vedenie šmýkadla. Pohyb šmýkadla je zabezpečený pomocou guľčikovej skrutky. Vedenie pozostáva so špeciálnych ložísk a valivých hniezd od spoločnosti INA. Vzhľadom k tomu, že šmýkadlo je koncový člen kinematického reťazca, je lineárna os vybavená priamym odmeriavaním Heidenhain.

Obr. č. 7.3-7 Šmýkadlová část suportu s valivými elementmi



d) Podmnožina S3 – patria do nej veličiny v_3 , ktoré vyjadruje takú aktiváciu entity Ω z jej okolia, ktorá na entite vyvoláva procesy, podnety, príčiny – aktivačné veličiny

Jedná sa o veličiny, ktoré spôsobujú nežiaduce deformácie a ovplyvňujú výslednú presnosť stroja. Vzhľadom k tomu, že zadaný problém sa týka teplotných deformácií, aktivačná veličina bude teplota. Najdôležitejšou časťou pri určovaní veličiny v_3 , v oblasti teplotne-elastických analýz u zložitejších štruktúr, je určenie zdrojov tepla, ktorých zaťažujúci účinok nie je zanedbateľný.

V prvom rade je potrebné stanoviť prevádzkové podmienky stroja. Meranie a určovanie teplotných veličín pri tzv. normálnych podmienkach je problém, ktorý presahuje úroveň diplomovej práce, preto som sa pridržiaval podmienok, ktoré vychádzajú z normy ISO230-3. Táto časť normy špecifikuje skúšobné postupy pre určovanie tepelných vplyvov spôsobených rôznymi teplotnými zdrojmi na strojoch nezaťažených alebo za dokončovacích podmienok. Na stroji je možné nájsť viacero potenciálnych zdrojov tepla, ktoré za určitých podmienok „dokážu“ generovať teplo. Jedná sa predovšetkým o motory, prevodovky, guľčkové skrutky, ložiská. Pri určitých pohyboch (napr. rýchloposuv) vzniká teplo v dôsledku trenia. Bola uvažovaná nasledovná konfigurácia stroja, z ktorej potom vyplýva rozloženie aktivačných veličín v_3 :

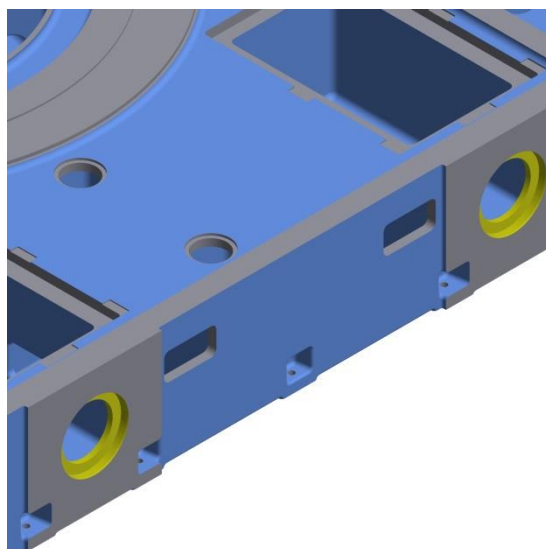
- *Stroj nie je zaťažený obrábacím cyklom*
- *Upínacia doska sa otáča v zvolenom rozsahu otáčok*
- *Ostatné pohyblivé časti (priečnik, suport, šmýkadlo) sa voči sebe a voči upínacej doske nepohybujú (pohony a lineárne členy týchto častí neprodukujú teplo)*

Zdroje tepla

I. Planétová prevodovka HEYNAU SG 5000 (2ks)

Prevodovka je radená za hlavný pohon SIEMENS. Je montovaná na lôžko, preto vytvára priamy tepelný most s rámom stroja. V dôsledku kondukcie sa teplo z plášťa prevodovky šíri do rámu stroja. Na obrázku sú zobrazené montážne otvory.

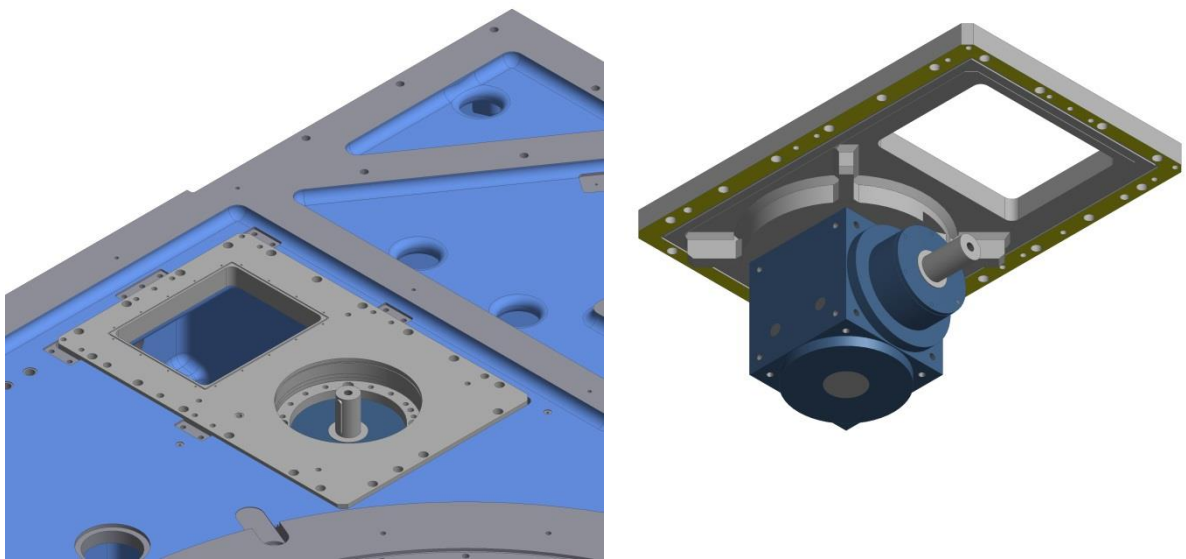
Obr. č. 7.3-8 Montážne otvory pre planétovú prevodovku



II. Kuželová prevodovka GRAESSNER P280L (2ks)

Za planétovou prevodovkou je radená spojka a následne kuželová prevodovka. Tá je pripevnená k lôžku pomocou špeciálnej upínacej dosky. Na obrázku je zobrazené prevedenie uloženia. Aktivačná veličina je teplota, ktorá vzniká v prevodovke. Následne cez montážnu prírubu a dosku prevodovky sa teplo prenáša do lôžka sústruhu. Dôležité je, že teplo je vedené len cez plochu vyznačenú žltou farbou, pretože na bočných stranách uloženia je vôľa.

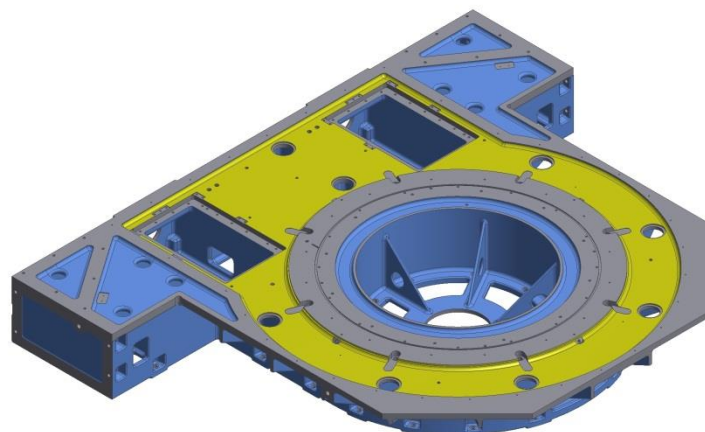
Obr. č. 7.3-9 Konštrukčné spojenie kužeľovej prevodovky s lôžkom



III. Hydrostatické ložisko

Upínacia doska je uložená v hydrostatickom ložisku. Olej, ktorý je privádzaný do ložiska má určitú teplotu. Vplyvom trenia v ložisku sa táto teplota mení. Olej z ložiska sa rozlieva na lôžko stroja a odtiaľ cez odtokové otvory odchádza do chladničky. Olej je teda v bezprostrednom kontakte s lôžkom. Na obrázku je vyznačená plocha, na ktorej pôsobí zohriata tekutina – olej.

Obr. č. 7.3-10 Zobrazenie plochy ovplyvnenej olejom z HS ložiska



e) **Podmnožina S4** – táto podmnožina obsahuje veličiny v_4 , ktoré ovplyvňujú entitu z okolia, konkrétne na nej prebiehajúce procesy

V podmnožine S0 bolo popísané environmentálne prostredie stroja. V podmnožine S4 je potrebné tieto veličiny kvantifikovať. Konvekcia ovplyvňuje teplotné pomery na stroji a tým pádom aj hodnotu deformácie. Ak by bol požadovaný presnejší výsledok výpočtu, bolo by potrebné uskutočniť veľké množstvo meraní. Výsledky týchto meraní by následne slúžili ako okrajové podmienky pre výpočtový model. Model by bol neporovnateľne zložitejší a bolo by nutné použiť špeciálny softvér (napr. ANSYS Fluent) a hardvér (výpočtové stanice, clustery). Budú použité nasledovné zjednodušujúce predpoklady:

- Teplota okolia bude vždy konštantná 22°C
- Radiácia nebude uvažovaná
- V prípade uvažovania prestupu tepla, bude súčiniteľ prestupu tepla konštantá, teplota okolia tiež konštantá (zjednodušený prípad voľnej konvekcie)
- Súčiniteľ prestupu tepla je zvolený: $5 \cdot 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$

f) **Podmnožina S5** – veličiny v_5 , ktoré vyjadrujú vlastnosti prvku štruktúry entity

Z hľadiska fyzikálnej podstaty sa jedná o problém z termomechaniky, konkrétne šírenie tepla, resp. látky. Entita, ktorá je predmetom záujmu je trojrozmerné teleso so zložitou štruktúrou. Entita Ω , teda rám zvislého sústružníckeho centra a jeho podobjekty sú vyrobené z rozdielnych materiálov, ktoré udáva tabuľka.

Tabuľka 7.3-1 Materiál jednotlivých komponent

Objekt	Materiál
Lôžko	šedá liatina (GG25)
Pravý stojan	šedá liatina (GG25)
Ľavý stojan	šedá liatina (GG25)
Priečka	šedá liatina (GG30)
Priečnik	šedá liatina (GG25)
Suport – saňová časť	šedá liatina (GG25)
Suport – šmýkadlová časť	šedá liatina (GG25)
Šmýkadlo	šedá liatina (GG25)
Uholník (2ks)	Oceľ triedy 12
Doska prevodovky (2ks)	Oceľ triedy 12
Montážna príruha prevodovky (2ks)	Oceľ triedy 12

Tabuľka 7.3-2 Vybrané materiálové charakteristiky

	Jednotka	GG25	GG30	Oceľ
Modul pružnosti v ťahu E	MPa	$1,1 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^5$
Poissonovo číslo ν	-	0,26	0,26	0,3
Hustota ρ	kg / m^3	7200	7250	7850
Merná tepelná kapacita c	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	460	460	460
Lineárny koeficient teplotnej rozťažnosti α	K^{-1}	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$
Tepelná vodivosť	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	48,5	47,5	50

Tabuľka 7.3-2 zobrazuje vybrané materiálové charakteristiky, ktoré sú potrebné pre výpočet. Niektoré hodnoty (napr. koeficient tep. rozťažnosti) sú funkciou teploty. Teplotné gradienty v riešenom probléme nie sú výrazne veľké, preto je možné uvažovať tieto hodnoty ako konštantné. Boli uvažované hodnoty pre referenčnú hodnotu teploty 22°C. Materiál GG25, GG30 predstavuje liatinu s lamelárnym grafítom. Charakteristiky ocele odpovedajú hodnotám pre oceľ triedy 12.

- g) Podmnožina S6** – obsahuje veličiny v_6 popisujúce procesy prebiehajúce na entite, uvádzajú entitu do rôznych stavov, odlišných od počiatočných

Problém je riešený na makroúrovni, preto nie sú podstatné procesy, ktoré prebiehajú v štruktúre materiálu. V tomto prípade nie sú riešené procesy, ktoré vedú k deformácii rámu stroja. Preto je táto množina prázdna. Malé zhrnutie o mikroskopickom pohľade na teplo a teplotnú rozťažnosť je možné nájsť v kapitole 2.1.1.

- h) Podmnožina S7** – patria sem veličiny v_7 vyjadrujúce prejavy entity, ktoré odpovedajú stavom, do ktorých sa entita dostala v dôsledku prebehnutých procesov.

Pôsobením aktivačných veličín v_3 sa zmenia teplotné pomery na entite Ω (rám stroja), ktorá sa následne deformuje.

- i) Podmnožina S8** – zahrňuje veličiny v_8 popisujúce dôsledky prejavov entity na jej okolie alebo na ňu samotnú.

Vplyvom teplotnej deformácie sa zmení geometrická presnosť sústružníckeho stroja. Vznikne chyba, ktorá sa prenáša na špičku nástroja a následne na obrobok. Vzniká nepresnosť vo výrobe súčiastok. Medzné stavy je možné definovať ako funkčne prípustné.

7.4. Typ problému

Jedná sa o priamy príčinný problém. Do algoritmu vstupujú podmienky okolia S0 – S5. Výstupom z algoritmu sú podmnožiny S7 a S8, keďže podmnožina S6 je prázdna.

8. VÝBER METÓDY RIEŠENIA, SOFTVÉRU A HARDVÉRU

8.1. Výber metódy riešenia

V oblasti výpočtových analýz súvisiacich s teplotným zaťažením je možné použiť vo všeobecnosti dva prístupy. Prvý prístup spočíva vo využití analytických metód a uvažovanie spojitého telesa. Táto metóda je najpresnejšia, ale je výrazne obmedzená na objekty jednoduchších tvarov s uvažovaním izotropného materiálu a konštantných materiálových vlastností (napr. koeficient tepelnej rozťažnosti sa mení v závislosti na teplote). Druhá metóda spočíva v rozdelení spojitého telesa na konečný počet diskretných častí a pomocou vhodnej matematickej teórie sa riešia problémy na úrovni jednotlivých elementov. Výhodou tejto metódy je možnosť riešiť náročné úlohy.

Problém mojej práce, ktorý bol úplne definovaný v kapitole 7 je v podstate riešiteľný len pomocou matematickej Metódy konečných prvkov. Ďalšou možnosťou sú experimentálne merania, ktoré sú finančne a časovo náročné.

8.2. Použitý softvér

V nasledujúcom texte uvádzam softvérové prostriedky, ktoré boli použité pri riešení zadaného problému. Jedná sa o softvéry typu CAD (Computer-Aided Design) a FEA (Finite Element Analysis).

Geometriu som dostal od spoločnosti Toshulin v elektronickej forme, konkrétne sa jednalo o súbor typu .step. Tento súbor obsahoval celú zostavu bez väzieb. Na úpravu geometrického modelu (kapitola 10) bol použitý softvér Autodesk Fusion v kombinácii s programom Autodesk Inventor.

Pripravený geometrický model bol importovaný do softvéru určeného pre riešenie parciálnych diferenciálnych rovníc metódou konečných prvkov. V počiatočnej fáze som sa rozhodol medzi nasledujúcimi softvérmi:

- Patran spolu so solverom Marc od spoločnosti MSC
- Autodesk Simulation
- Ansys APDL s využitím makier
- Ansys Workbench

Bol zvolený program Ansys s užívateľským prostredím Workbench. Hlavným dôvodom je interaktívne a užívateľsky prívetivé prostredie, ktoré je vhodné pre typ úlohy so zložitou geometrickou štruktúrou a väčším počtom väzieb. Toto prostredie má taktiež na vysokej úrovni generátor konečno-prvkových sietí. A v neposlednom rade má prostredie progresívnu popularitu u popredných strojárskych spoločností, ktoré ho využívajú pre vývoj a kontrolu svojich produktov.

Obr. č. 8.2-1 Použitý softvér



9. METÓDA KONEČNÝCH PRVKOV

Táto metóda slúži k simulácii rôznych fyzikálnych javov. Princíp spočíva v diskretizácii kontinua do na určitý počet prvkov. Parametre jednotlivých prvkov sú určované v uzlových bodoch.

9.1. Statické pevnostné výpočty

Uvažujme teleso z pružného izotropného materiálu, ktoré je zaťažené silami (plošnými, objemovými, bodovými). Sily pôsobiace na teleso sú ustálené (konštantné), nezávisia na čase, preto hovoríme o statickej úlohe. Potom rozlišujeme:

Posunutie o ktoré sa premiestni všeobecný bod telesa:

$$u = \begin{bmatrix} u(x, y, z) \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (9.1)$$

Deformáciu vo všeobecnom bode telesa:

$$\varepsilon = [\varepsilon_x(x, y, z), \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}]^T \quad (9.2)$$

Napätie vo všeobecnom bode telesa (tenzor 2. rádu):

$$\sigma = [\sigma_x(x, y, z), \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}]^T \quad (9.3)$$

Medzi deformáciou a posunutím platia lineárne geometrické rovnice (Cauchyho):

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} & \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} & \varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} & \gamma_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} & \gamma_{zx} &= \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{aligned} \quad (9.4)$$

Medzi napätím a deformáciami platia tzv. fyzikálne zákony:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E}(\sigma_x - \mu\sigma_y - \mu\sigma_z) \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E}(-\mu\sigma_x + \sigma_y - \mu\sigma_z) \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E}(-\mu\sigma_x - \mu\sigma_y + \sigma_z) \end{aligned} \quad (9.5)$$

Pre odvodenie rovníc vhodných pre numerické riešenie sa využíva princíp minima celkovej potenciálnej energie:

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_V \epsilon^T \sigma dV - \int_V u^T b dV - \int_S u^T p dS - \sum_{i=1}^n u_i^T F_i \quad (9.6)$$

kde prvý člen na pravej strane predstavuje energiu napätosti a ostatné členy potenciálnu energiu vonkajších síl vzťahovanú k stavu pre deformáciu

Na celkovú potenciálnu energiu telesa sa z matematického hľadiska môžeme pozeráť ako na funkcionál, ktorého argumentom je vektor posunutí, resp. funkcie u , v , w ktoré obsahuje tento vektor. Pri skutočných hodnotách posunutí u , v , w tento funkcionál nadobúda minimálnu hodnotu, pretože pre zaťažené teleso v rovnovážnom stave platí princíp minima celkovej potenciálnej energie. Ten hovorí o tom, že zo všetkých možných stavov posunutí bodov zaťaženého telesa, nastane ten, ktorý dáva minimálnu hodnotu celkovej potenciálnej energie telesa.

$$\Pi = \text{minimum} \quad (9.7)$$

9.2. Prenos tepla vedením

Využívajú sa všetky princípy, ktoré platia aj pri pevnostných úlohách. Vychádza sa z diferenciálnej rovnice popísanej v úvode práce.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q}_{zdroj} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$

Túto rovnicu je nutné doplniť okrajovými podmienkami, ktoré majú najčastejšie nasledovnú podobu:

1. Predpísanie teploty na časti povrchu telesa
2. Predpísanie tepelného toku na časti povrchu telesa
3. Zadanie prestupu tepla konvekciou (na časti povrchu)

10. TVORBA VÝPOČTOVÉHO MODELU

Aby bol geometrický model použiteľný ako základ pre výpočtový model musel byť upravený. V nasledujúcich podkapitolách sú popísané všetky úpravy. Úpravy boli uskutočnené na základe rešpektovania určitých všeobecných zásad pri tvorbe výpočtových modelov. Vytváranie modelu bolo rozdelené na dve časti. V prvom kroku bude analyzovaná a upravovaná pevná časť rámu, teda lôžko, oba stojany, uholníky a horná priečka. V druhej časti bude následne na upravenú geometriu pridaná pohyblivá časť sústavy.

10.1. Pevná časť rámu

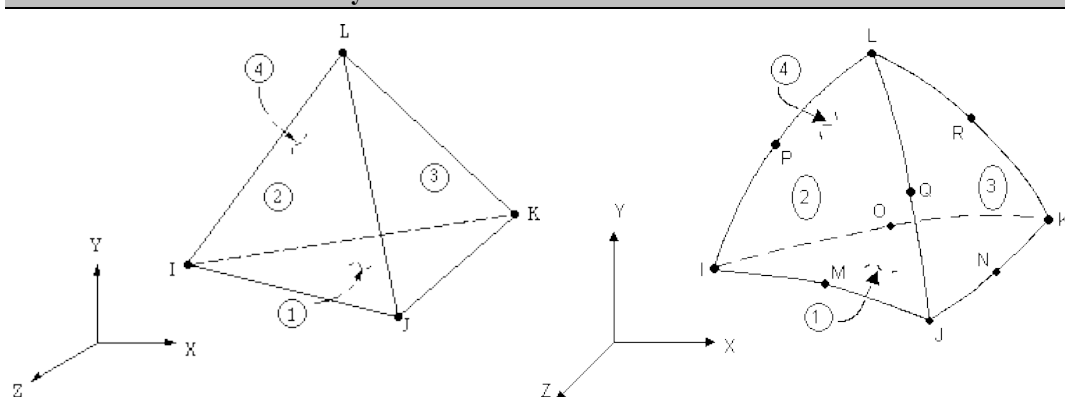
Postup pri tvorbe modelu je nasledovný:

- 1) *Vhodnými úpravami zjednodušenie geometrie jednotlivých objektov*
- 2) *Vytvorenie vhodnej konečno-prvkovej siete*

Konštrukcia rámu pozostáva zo zložitých geometrických tvarov, preto bola volená tzv. voľná sieť zložená výlučne zo štvorstenov. Výhodou je dobrá aproximácia v oblasti zaoblení a dier. Pre prúdenie kvapalín, alebo úlohy spojené s vedením tepla v zložitých geometrických objektoch sa používa element nižšieho rádu, ktorý má štyri uzlové body. Tieto prvky je možné použiť na teplotné úlohy a následne i na deformačno-napätostné. V prvom prípade má každý uzlový bod jeden stupeň voľnosti – teplotu, v druhom prípade v každom uzle sú neznáme tri navzájom kolmé posunutia v jednotlivých smeroch kartézkeho súradnicového systému. Kvalita siete bola v programe ANSYS hodnotená pomocou parametrov „šikmost“ (skewness) a „pomer strán“ (aspect ratio).

Pre spresnenie výpočtu (najmä pevnostného) je možné pridať uzlové prvky i na stredy hrán. Vznikne tak prvok vyššieho rádu s desiatimi uzlovými bodmi. S výhodou sa využíva kombinácia oboch spomínaných prvkov. (4-uzlové pre prúdenie a 10-uzlové pre statické úlohy). V prostredí ANSYS workbench sú tieto prvky označené ako TET4, resp. TET10.

Obr. č. 10.1-1 Použité elementy



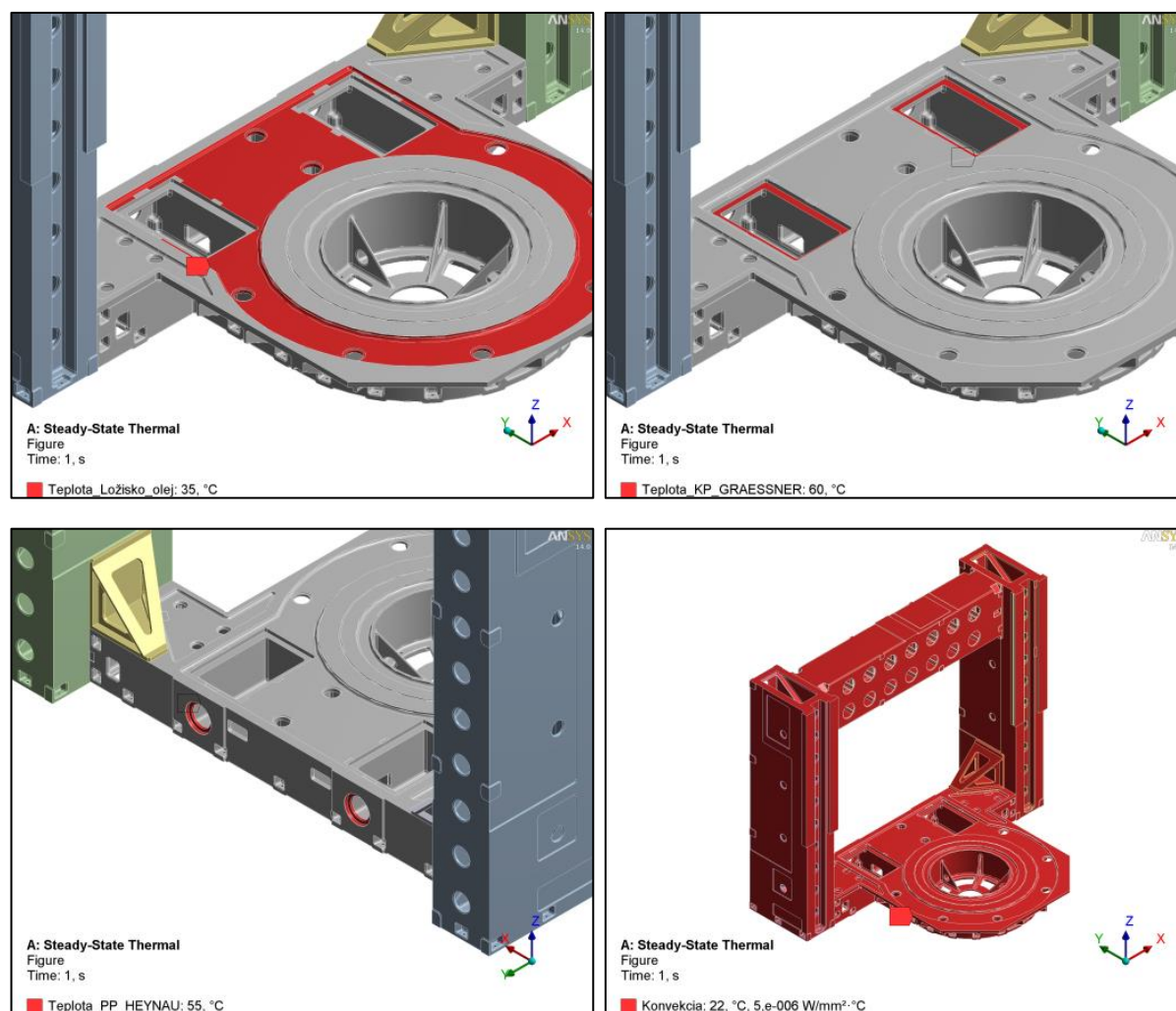
- 3) *Aplikácia okrajových a počiatkových podmienok pre všetky modely*

Pre postupné odvodzovanie modelu bude použitá stacionárna analýza rozloženia teplôt v ráme stroja. Počiatková podmienka vyjadruje počiatkový teplotný stav entity. V tomto prípade bude uvažovaná počiatková teplota 22°C. Okrajové podmienky sú vyjadrené aktivačnými veličinami v_3 popísanými v systéme podstatných veličín. Konkrétne hodnoty

teplôt nie sú v tejto časti riešenia dôležité, preto pre odvodzovanie výpočtového modelu boli zvolené nasledujúce hodnoty:

Teplota oleja v HS ložisku	35°C
Teplota planétovej prevodovky – HEYNAU	55°C
Teplota kuželovej prevodovky – GRAESSNER	60°C
Teplota okolitého vzduchu – voľná konvekcia	22°C

Obr. č. 10.1-1 Podmienky pre teplotne-deformačnú analýzu



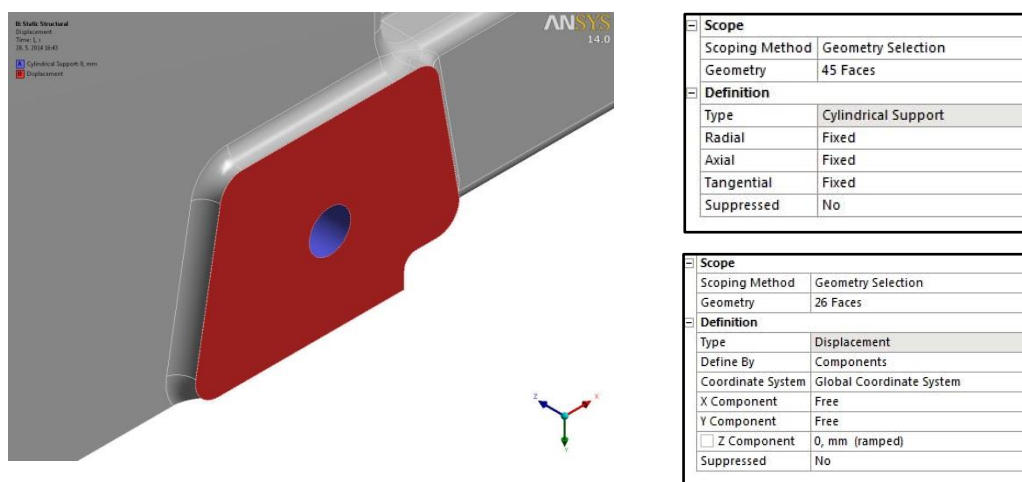
Poznámka:

Hore uvedené hodnoty sú síce volené, ale rádovo sa blížia k hodnotám nameraným. Stacionárne javy vedenia a prestupu tepla sa v oblasti výrobnej techniky takmer nevyskytujú, pretože podmienky sa menia v čase. Aj pri uvažovaní nezaťažného stroja reznými silami a inými obrábacími vplyvmi závisí teplotné chovanie stroja napr. od otáčok motorov a prevodoviek, zmenami prostredia atď. V praxi je však stacionárnu analýzu možné s výhodou využiť pri odvodzovaní výpočtového modelu, ktorý potom následne môže byť použitý aj pre nestacionárne výpočty.

Väzbové okrajové podmienky sú vyjadrené podmnožinou S2 v systéme podstatných veličín, kde už bolo uvedené, že všetky nepohyblivé časti rámu sú navzájom pospájané skrutkovými spojmami, teda pevnou väzbou. V programe ANSYS je táto väzba uvedená ako „bonded“. Tá zabraňuje pohybu na kontaktných plochách.

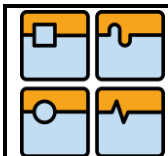
Ustavenie rámu na základ je tiež popísané podmnožinou S2. Tento typ spojenia je možné dosiahnuť v programe ANSYS viacerými spôsobmi. Bola zvolená väzba „cylindrical support“ a zamedzenie pohybu vo všetkých smeroch (radiálne, axiálne, tangenciálne). Na pätky lôžka a spodnú plochu stojanov, bola zadaná väzba, ktorá zabraňuje pohybu uzlových bodov na týchto plochách v smere osi z, v ANSYS väzba „remote displacement“.

Obr. č. 10.1-2 Väzby v mieste uloženia rámu na základ



4) porovnanie jednotlivých výsledkov

Výsledky zo stacionárnej teplotnej analýzy slúžia ako okrajové podmienky pre statický, lineárny výpočet deformácií, prípadne napätí. Pre porovnávanie výsledkov boli vhodne zvolené „kontrolné body“, kde budú porovnávané veľkosti deformácií pre modely rôznej úrovne. Globálny súradnicový systém sa nachádza v spodnej časti lôžka. Na obrázku č. 10.1-5 sú zobrazené kontrolné body, ktoré sa nachádzajú v počiatkoch zvolených lokálnych súradnicových systémov. Tieto systémy boli zvolené v bodoch, kde sa očakáva najväčší vplyv deformácie, ktorý následne ovplyvní výslednú presnosť stroja.

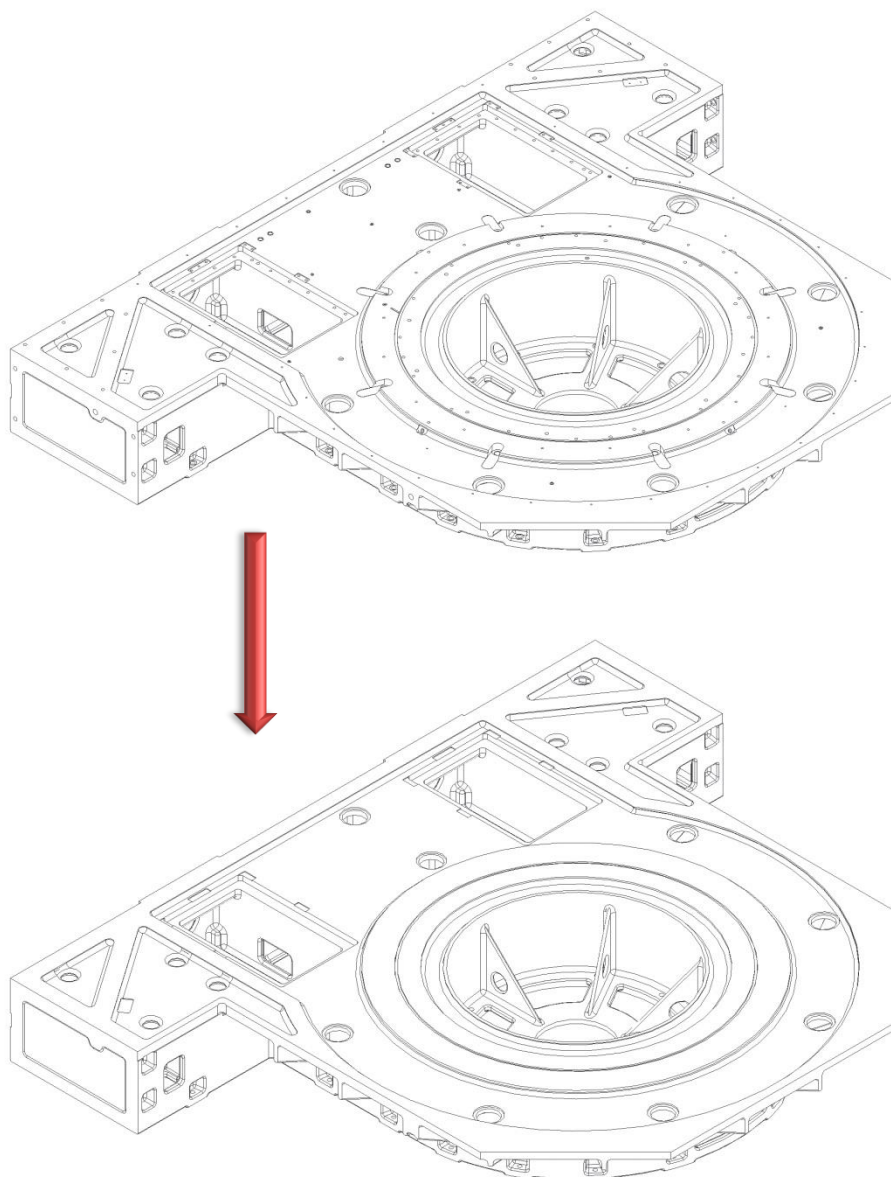


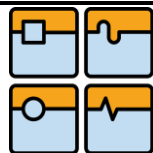
10.1.1. Model č. 1

Tento model vychádza z pôvodnej geometrie. Je obmedzený len na konštrukciu pozostávajúcu z lôžka, oboch stojanov, uholníkov a hornej priečky. Tieto celky obsahujú veľké množstvo dier (väčšinou závitových), ktoré slúžia k montáži rôznych konštrukčných skupín priamo na rám stroja. Ak uvažujeme, že skrutky vložené do dier sú vyrobené z bežných konštrukčných ocelí, ktoré majú príbuznú hodnotu tepelnej vodivosti a súčiniteľu teplotnej rozťažnosti s liatinou (GG25, GG30), je možné tieto diery zanedbať. Na obr. č. 11.1-2 je ukážka odstránenia dier pre lôžko, obdobne aj pre ďalšie objekty.

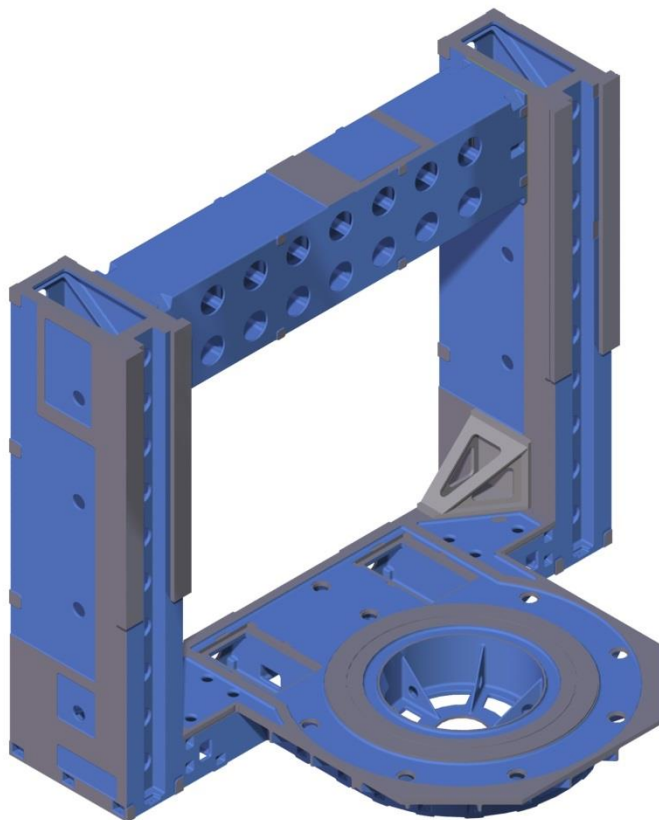
Model 1 je od skutočnej konštrukcie líši zanedbaním určitých dier. Je možné ho považovať za základný model.

Obr. č. 10.1-3 Zobrazenie odstránenia dier z lôžka

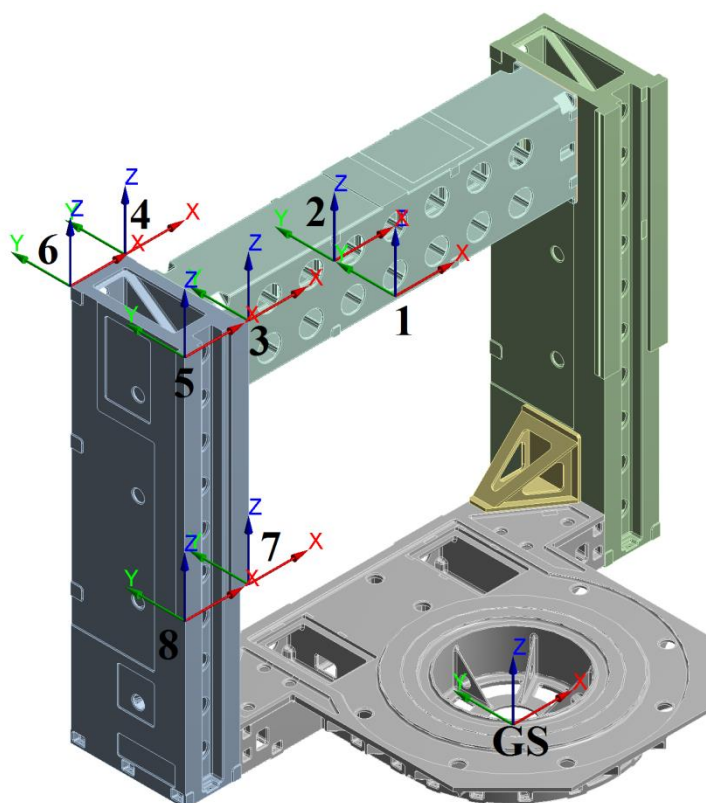




Obr. č. 10.1-4 Model č. 1 - geometria

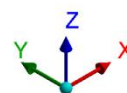


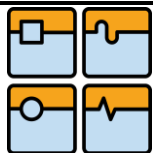
Obr. č. 10.1-5 Referenčné body, v ktorých bude porovnávaná veľkosť deformácie



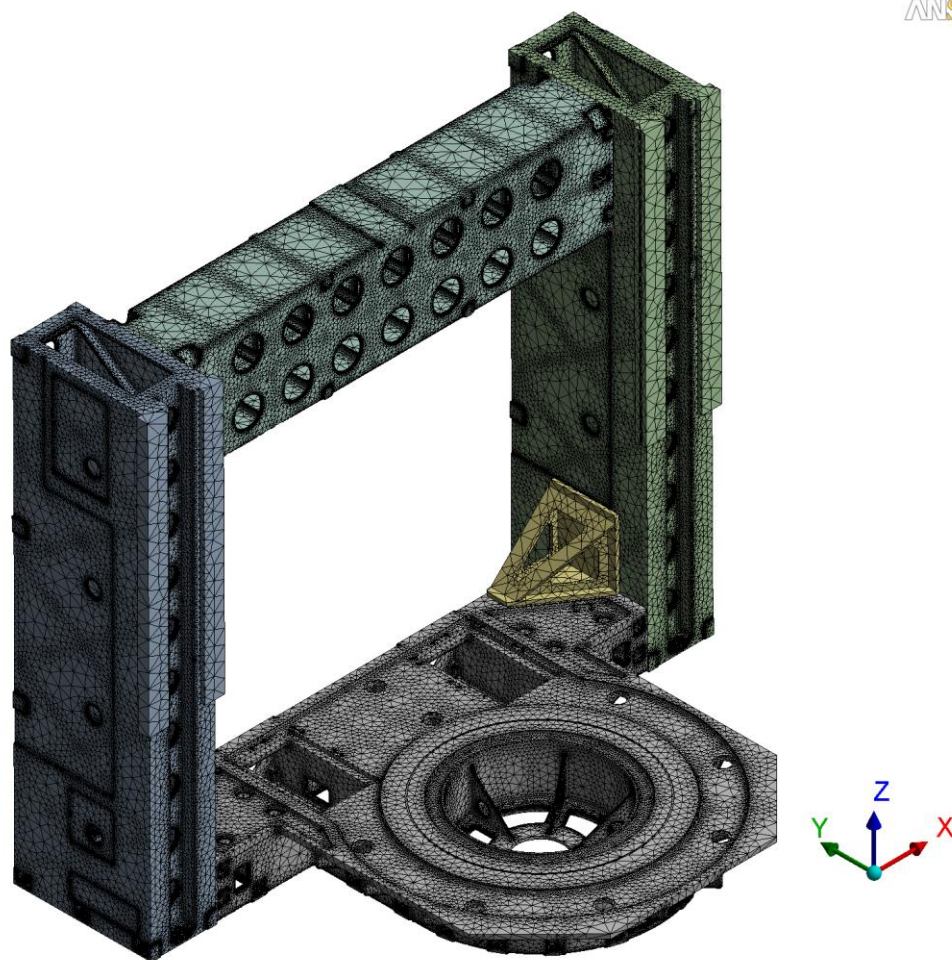
ANSYS
14.0

Kontrolné body 1,2 sú na spodnej strane priečky. Ostatné na hranách stojanu. Rám je symetrický, preto body len na jednej strane

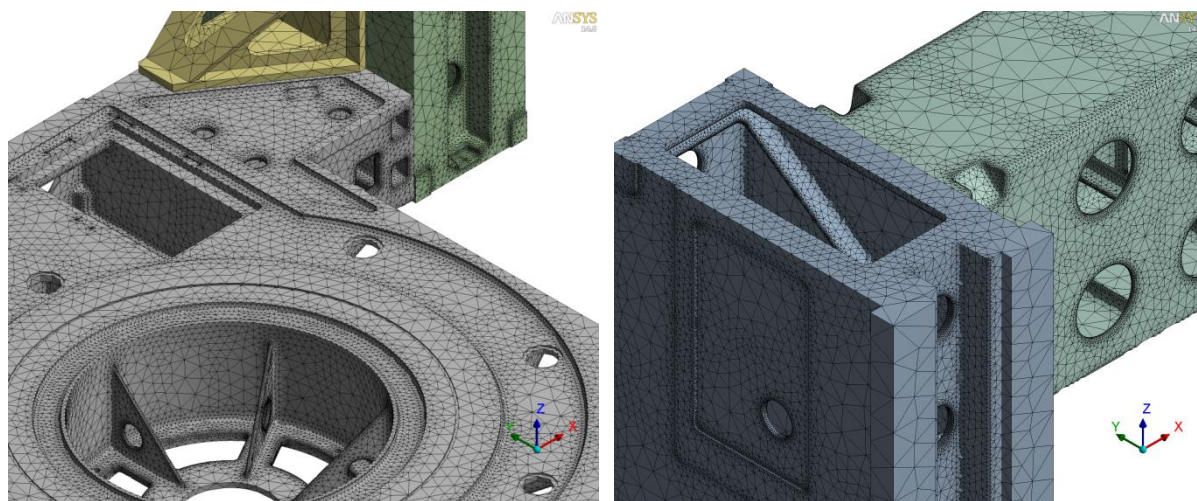


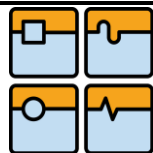


Obr. č. 10.1-6 Model č.1 - síť konečných prvků



Obr. č. 10.1-7 Model č. 1 - detailné pohľady na sieť





Obr. č. 10.1-8 Model č. 1 - rozloženie teplôt

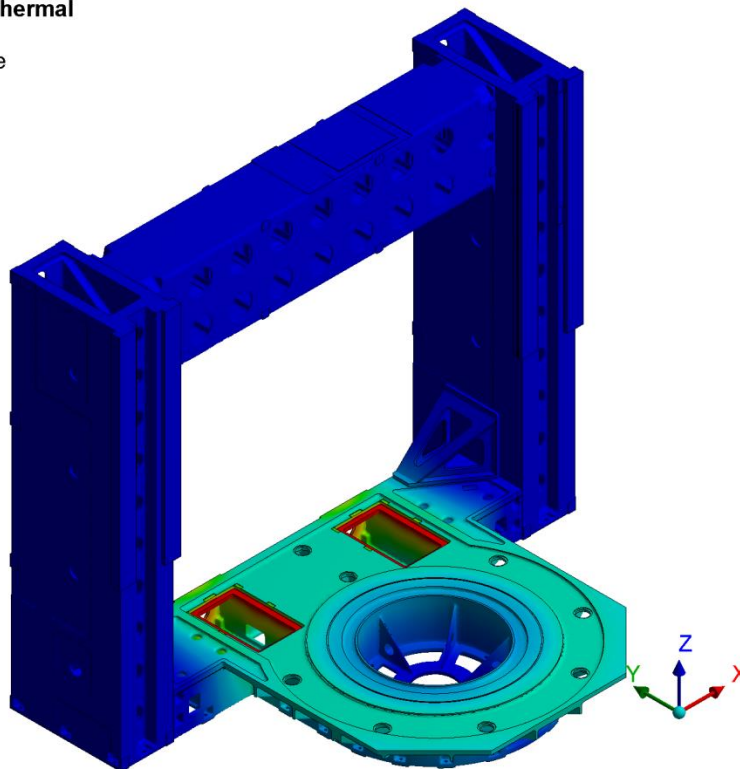
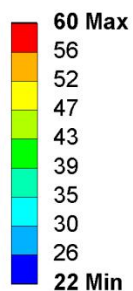
A: Steady-State Thermal

Figure

Type: Temperature

Unit: °C

Time: 1



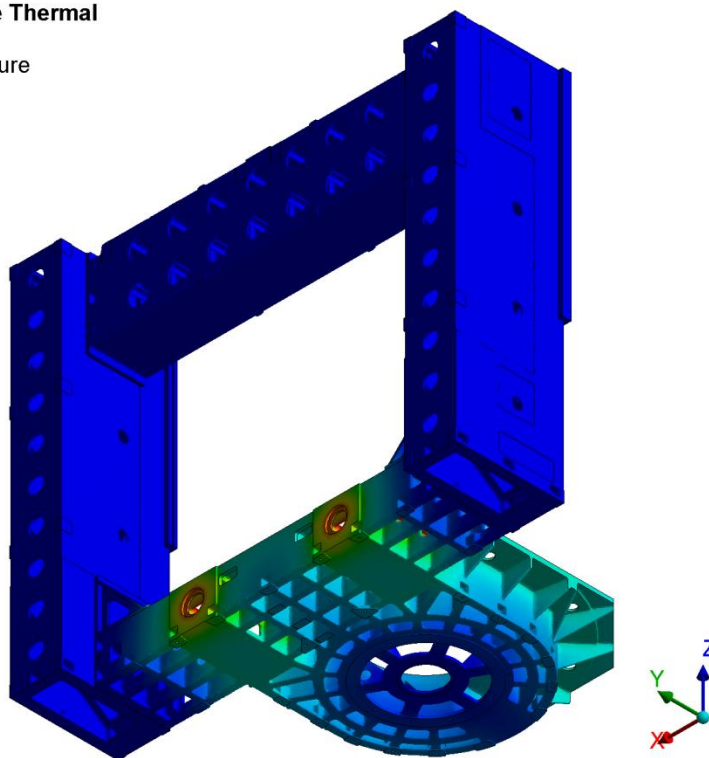
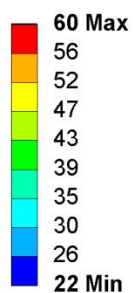
A: Steady-State Thermal

Figure

Type: Temperature

Unit: °C

Time: 1



Obr. č. 10.1-9 Model č. 1 - deformačná charakteristika

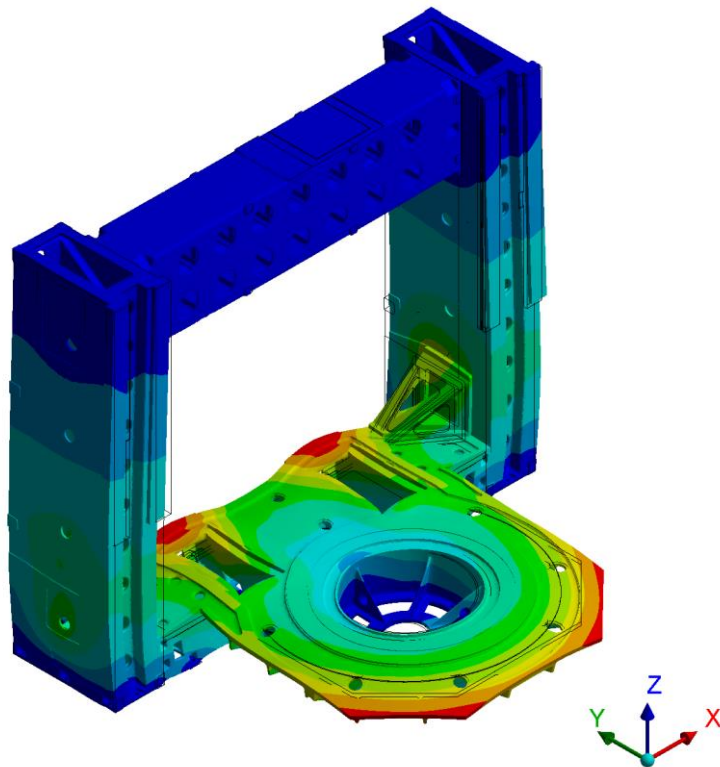
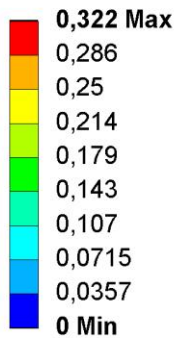
B: Static Structural

Figure

Type: Total Deformation

Unit: mm

Time: 1



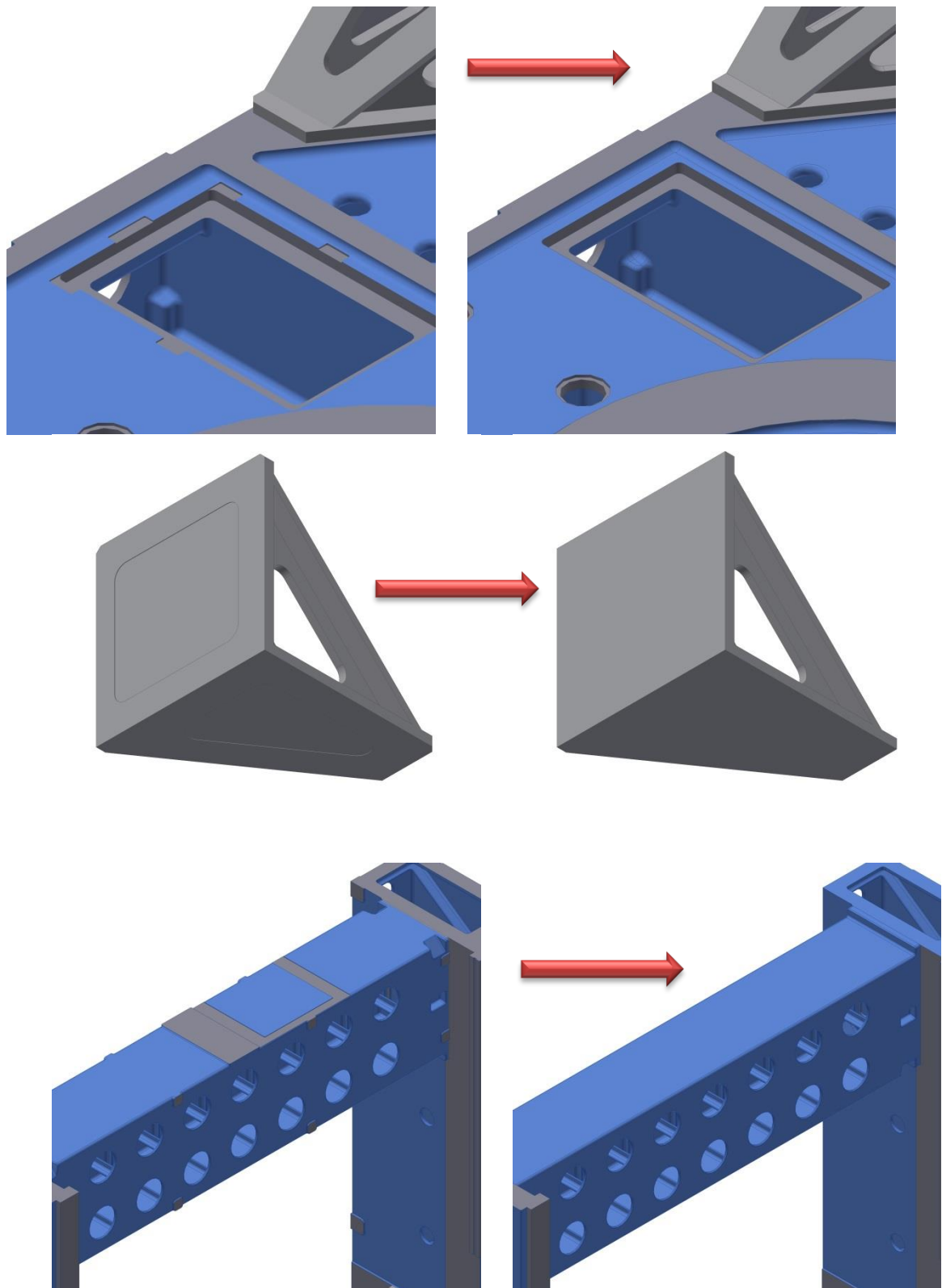
Tabuľka 10.1-1 Model č. 1 - parametre

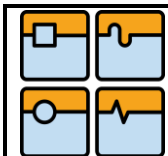
Typ elementu				TET4				
Počet elementov				4 025 243				
Počet uzlových bodov				1 003 322				
Deformácie vo vybraných bodoch v [µm]								
	BOD 1	BOD 2	BOD 3	BOD 4	BOD 5	BOD 6	BOD 7	BOD 8
X	5	4	9	7	9	7	-104	-103
Y	53	52	69	70	69	69	36	31
Z	-24	-33	-7	-24	19	-1	-4	17

10.1.2. Model č.2

Tento model obsahuje ďalšie úpravy geometrie. Týka sa to najmä geometrických prvkov, ktoré sú nepomerne malé vzhľadom k robustnosti modelu.

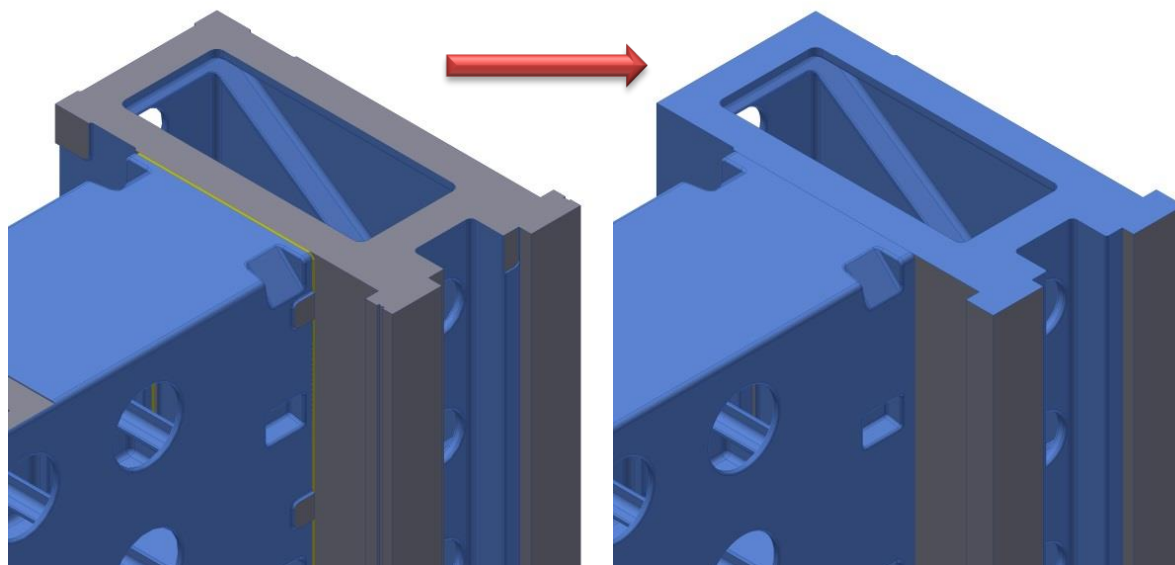
Obr. č. 10.1-10 Vybrané geometrické úpravy - model č. 2



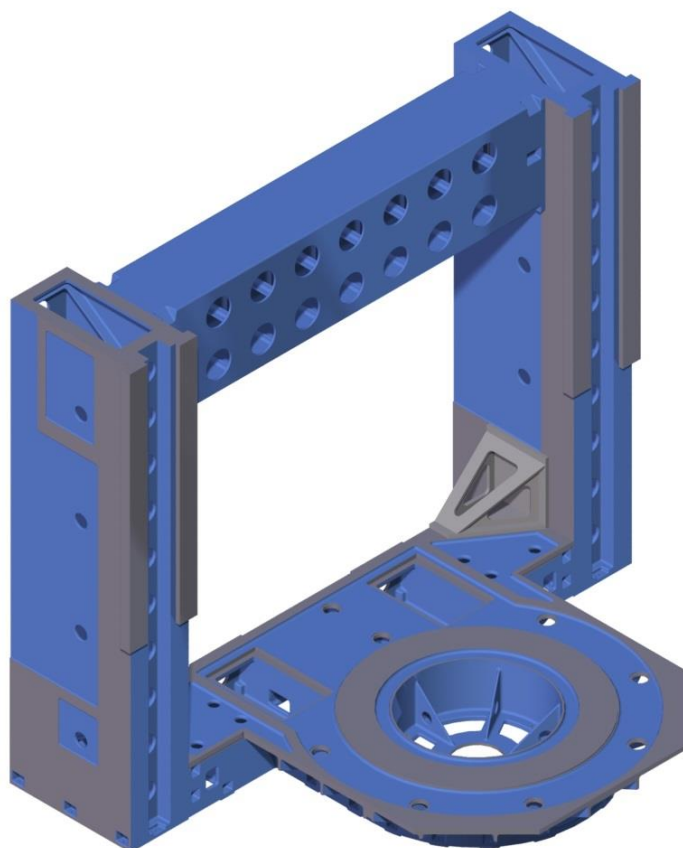


Súčasťou rámu sú aj dištančné kusy, ktoré slúži k praktickej montáži priečky k obom stojanom. V modeli č. 2 bola táto podložka vynechaná a namiesto nej bola o danú hodnotu upravená priečka. Riešenie je na nasledujúcom obrázku.

Obr. č. 10.1-11 Úprava súboru dištančných kusov

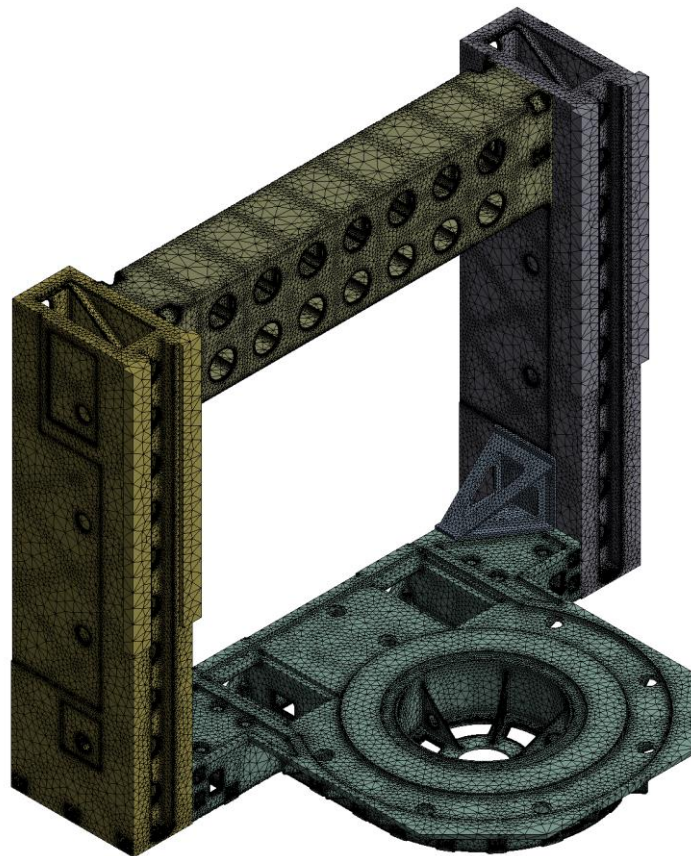


Obr. č. 10.1-12 Model č. 2 - geometria





Obr. č. 10.1-13 Model č. 2 - sieť konečných prvkov

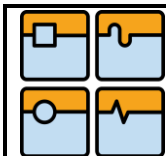
ANSYS
14.0

Poznámka:

Pre ďalšie modely už nebude graficky zobrazované rozloženie teplôt resp. deformácie. Tieto výstupy sú rovnaké ako u modelu č. 1. Keby tomu tak nebolo výpočtový model by bol chybný.

Tabuľka 10.1-2 Model č.2 - parametre

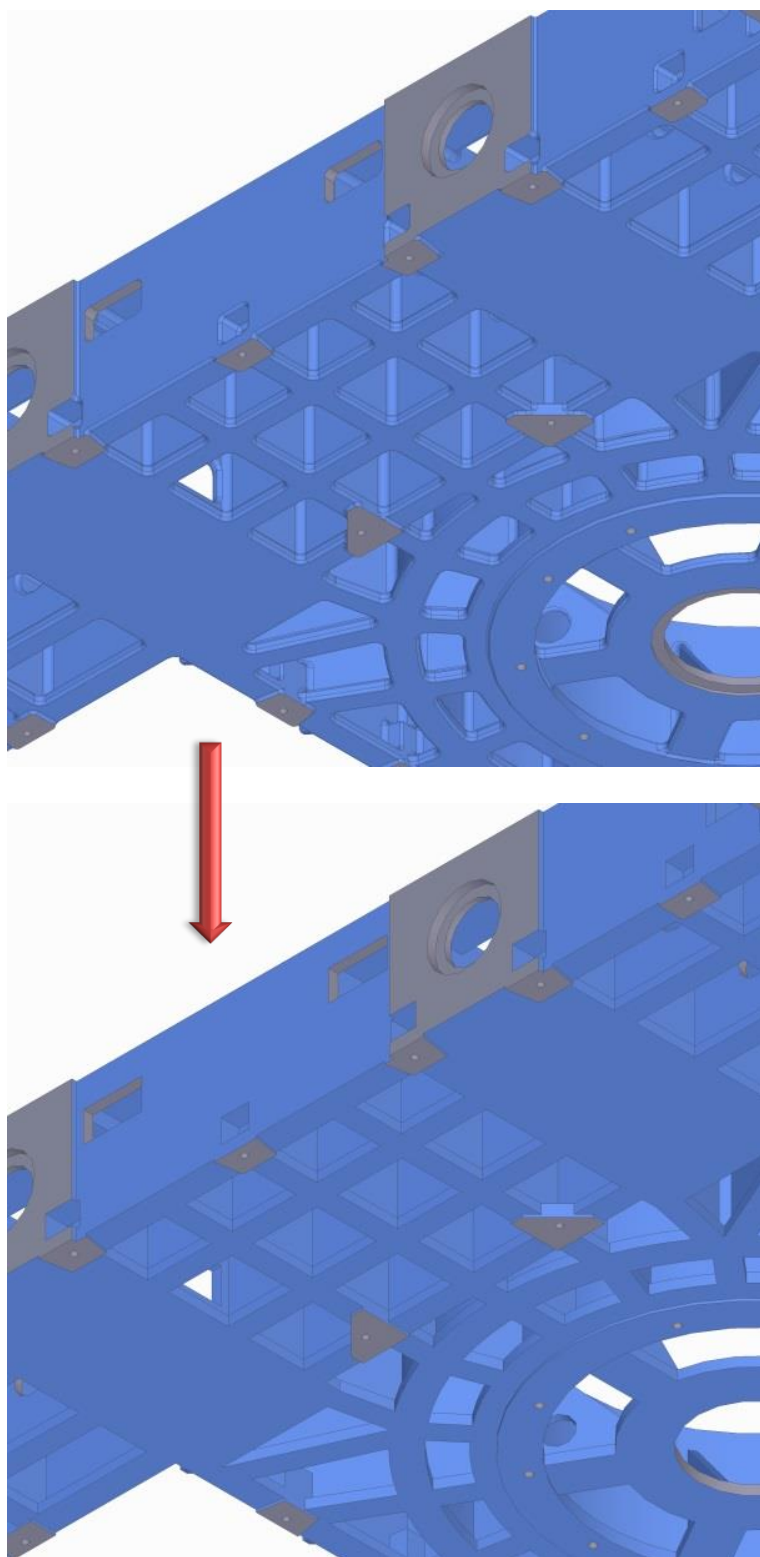
Typ elementu				TET4				
Počet elementov				3 947 859				
Počet uzlových bodov				987 974				
Deformácie vo vybraných bodoch [μm]								
	BOD 1	BOD 2	BOD 3	BOD 4	BOD 5	BOD 6	BOD 7	BOD 8
X	2	1	5	3	6	3	-104	-103
Y	51	50	66	67	66	66	36	29
Z	-24	-32	-7	-22	18	-1	29	16



10.1.3. Model č. 3

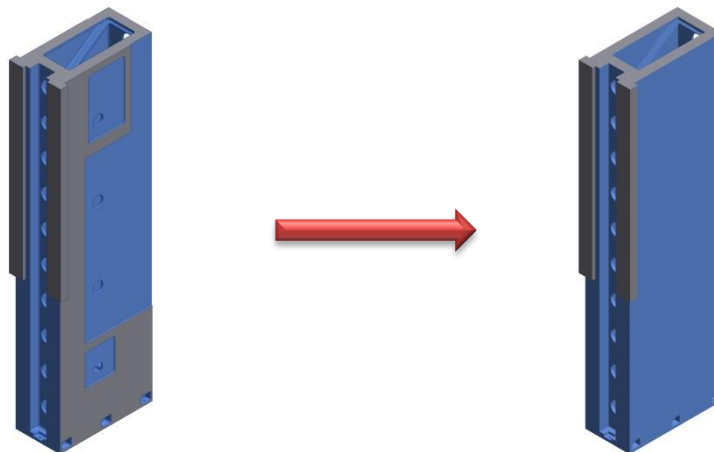
U tretieho a zároveň posledného modelu, ktorý reprezentuje nepohyblivú časť rámu budú odstránené všetky zaoblenia.

Obr. č. 10.1-14 Odstránenie zaoblení - model č. 3

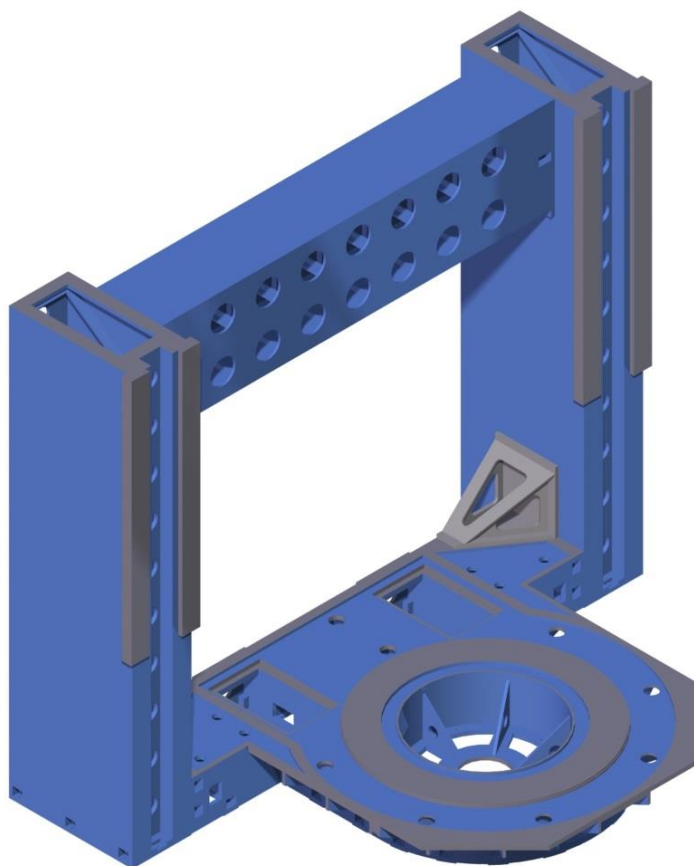


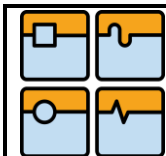
Na poslednom modeli budú tiež odstránené niektoré ďalšie geometrické prvky, ktoré by nemali mať vplyv na výslednú deformáciu.

Obr. č. 10.1-15 Zjednodušenie geometrie stojanov

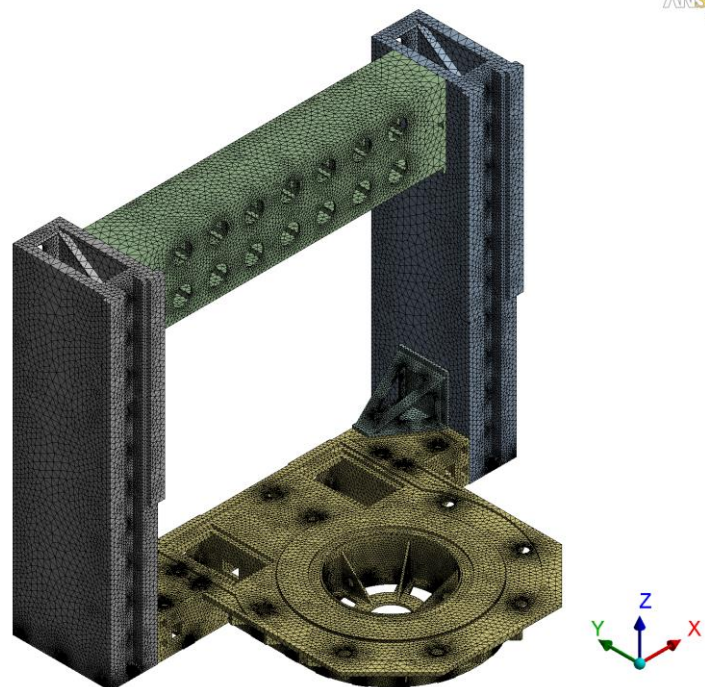


Obr. č. 10.1-16 Model č.3 - geometria

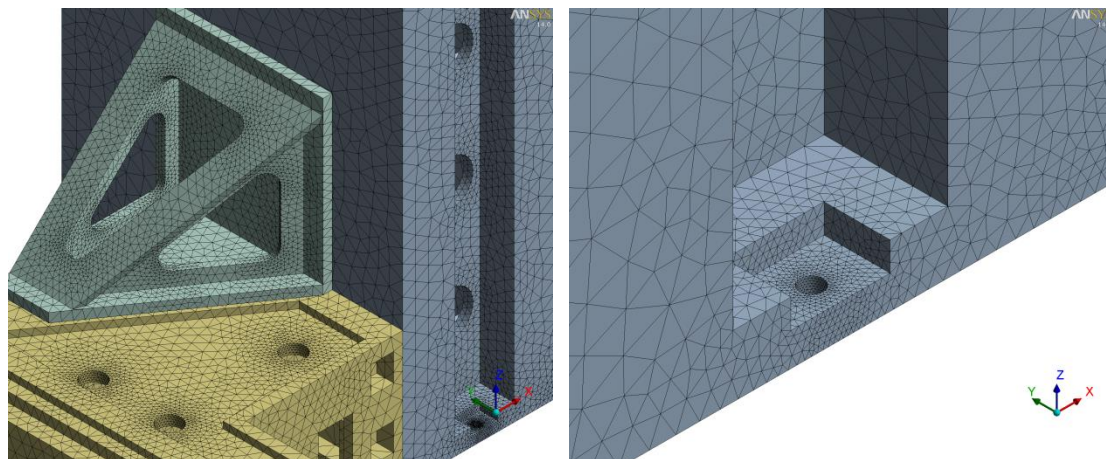




Obr. č. 10.1-17 Model č. 3 - sieť konečných prvkov



Obr. č. 10.1-18 Detailný pohľad na sieť konečných elementov



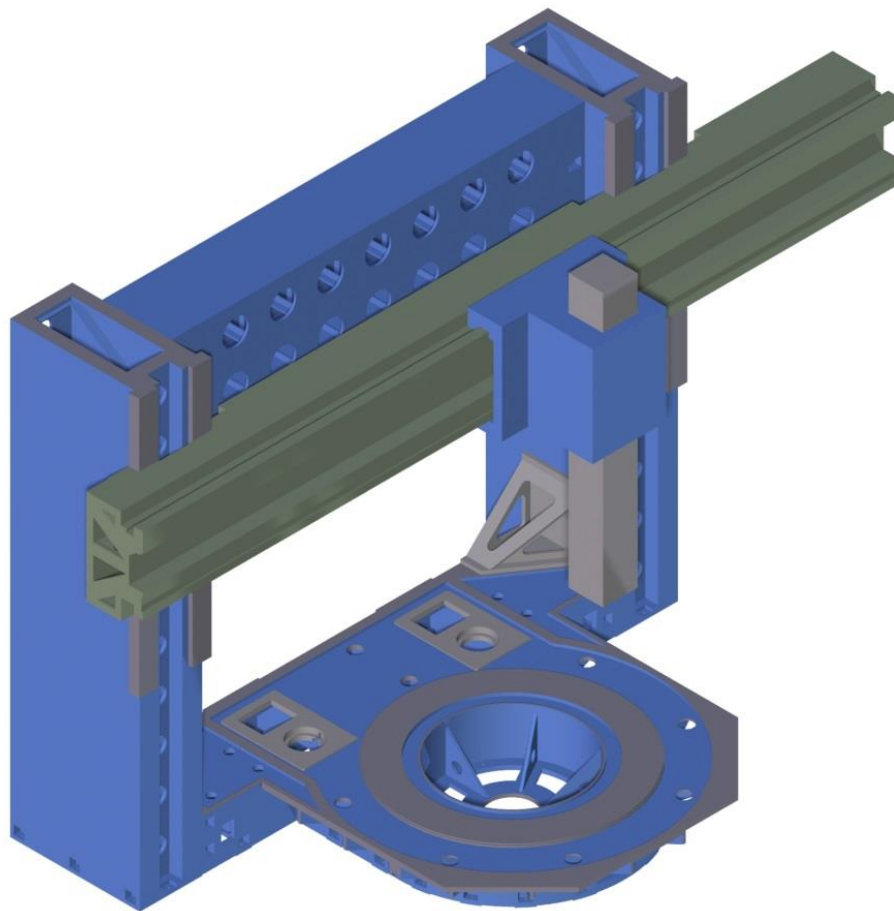
Tabuľka 10.1-3 Model č. 3 - parametre

Typ elementu	TET4							
Počet elementov	2 567 682							
Počet uzlových bodov	563 403							
Deformácie vo vybraných bodoch [µm]								
	BOD 1	BOD 2	BOD 3	BOD 4	BOD 5	BOD 6	BOD 7	BOD 8
X	0	0	6	2	6	2	-99	-98
Y	55	53	64	65	63	62	36	29
Z	-27	-35	-8	-22	15	-2	-6	14

10.2. Pohyblivá část

Ako už bolo pojednávané v určovaní systému podstatný veličín, konkrétne podmnožina S2, nejedná sa o vlastný rám stroja. Ak budú pozorne analyzované výsledky predchádzajúcich analýz, ktoré viedli k odvodeniu modelu rámu je možné zistiť, že vplyvom tepla sa rám deformuje výlučne na úrovni lôžka, oboch stojanov a vrchnej priečky. Aby boli získane ešte užitočnejšie poznatky ohľadom deformácie je možné cez ostatné podobjekty preniesť túto veličinu až na špičku nástroja, resp. jeho tesnú blízkosť. Preto bude pohybové ústrojenstvo slúžiť len na zobrazenie relevantnej deformácie na koncovom člene kinematického reťazca. Pre tento účel je vhodné použiť zjednodušenie, ktoré je zrejmé z obrázku geometrického modelu. Súčasťou je už aj príslušenstvo pre pripojenie kužeľových prevodoviek. Tento model bude v ďalšom texte označovaný ako kompletný model.

Obr. č. 10.2-1 Kompletný model - geometria



11. VYUŽITELNOSTĚ MODELU

Je predpoklad, že výpočtový model bude s väčšími či menšími úpravami využívaný v praxi. Preto je potrebné si položiť otázku, na čo má daný model slúžiť a aké simulácie môžu byť uskutočnené pri jeho využití. Model môže slúžiť len pre daný stroj, prípadne pre jeho príbuzné variácie. Tiež je dôležité uvedomiť si, v ktorej fáze výroby produktu je vhodné jeho použitie. Z technického hľadiska je potrebné zhodnotiť, ktoré konkrétne entity majú byť vylepšené alebo zmenené.

V tomto odseku krátko predstavím svoju ideu využitia modelu. Stroj je schopný obrábať v dvoch nezávislých osách. Konkrétne v osi Z, ktorá smeruje do vretena a v osi X, smer pojazdu suportu. Možnosť pridania ďalších operácií je spojené s využitím osi C, prípadne pridaním naklápanej hlavy. Vo všetkých prípadoch akékoľvek deformácie, spôsobené teplom, prípadné statickými účinkami je možné kompenzovať. To ale nie je možné v osi Y. Preto by model mal slúžiť hlavne k odstráneniu tohto nedostatku. Zmena konštrukcie, zmena materiálu, pridanie chladenia, prípadne nahrievanie určitej časti rámu vhodným médiom a mnohé iné ďalšie opatrenia je možné uskutočniť za účelom zvýšenia presnosti stroja. V nasledujúcich kapitolách budú príklady typov analýz uskutočnených pomocou výpočtového modelu.

11.1. Statické namáhanie

Model môže byť využitý pre riešenie statického namáhania od vlastnej hmotnosti jednotlivých komponent. Model bol zjednodušený, to znamená, že sa zmenila hmotnosť jeho častí. Preto bude každej súčasti priradená jedinečná hustota materiálu, ktorá tento fakt zohľadní. Hustota bude určená zo vzorca 11.1. Vážby sú obdobné ako v kapitole 10, jediným zaťažovacím účinkom je gravitačné zrýchlenie ($g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$)

$$\begin{aligned}
 m_{real} &= m_{model} \\
 \rho_{real} V_{real} &= \rho_{model} V_{model} \\
 \rho_{model} &= \frac{m_{real}}{V_{model}}
 \end{aligned}
 \tag{11.1}$$

kde index „real“ znamená pôvodný model a index „model“ značí kompletný model (obr. 10.2-1)

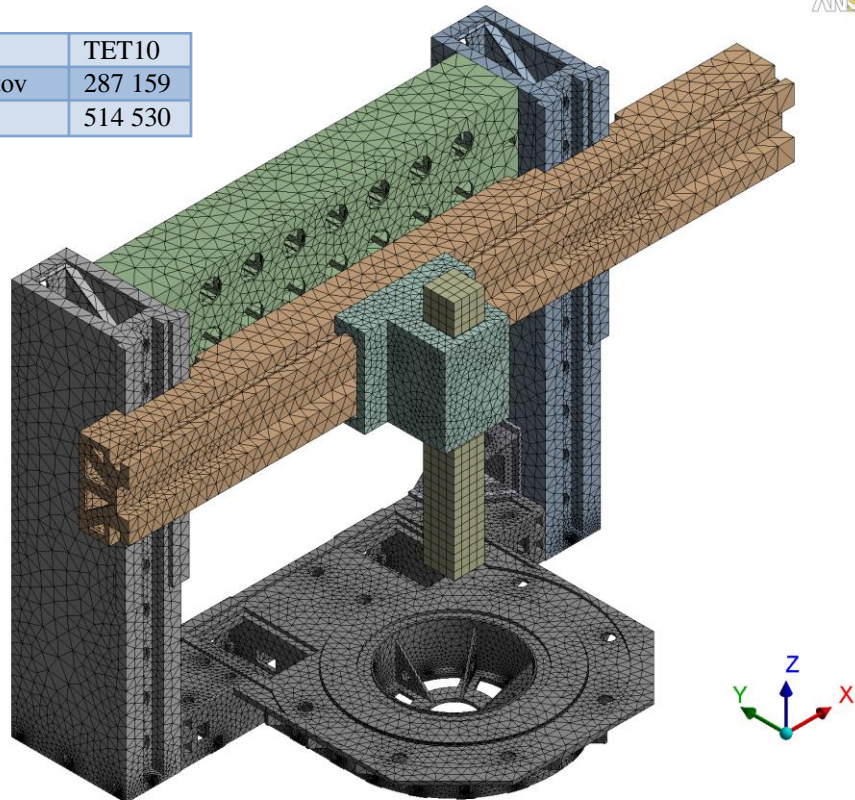
Tabuľka 11.1-1 Priradenie hustôt jednotlivým častiam modelu

Objekt	V _{model} [m ³]	m _{real} [kg]	ρ [kg/m ³]
Lôžko	1,85	14 078	7609
Pravý stojan	1,12	7830	6991
Ľavý stojan	1,12	7830	6991
Priečka	0,49	3758	7669
Priečník	1,74	12769	7338
Suport – saňová časť	0,85	1321+1585	3418
Suport – šmýkadlová časť			
Šmýkadlo	0,50	2153	4306
Uholník (2ks)	0,05	391	7820
Doska prevodovky (2ks)	Nie je súčasť modelu		
Montážna príruha prevodovky (2ks)	Nie je súčasť modelu		



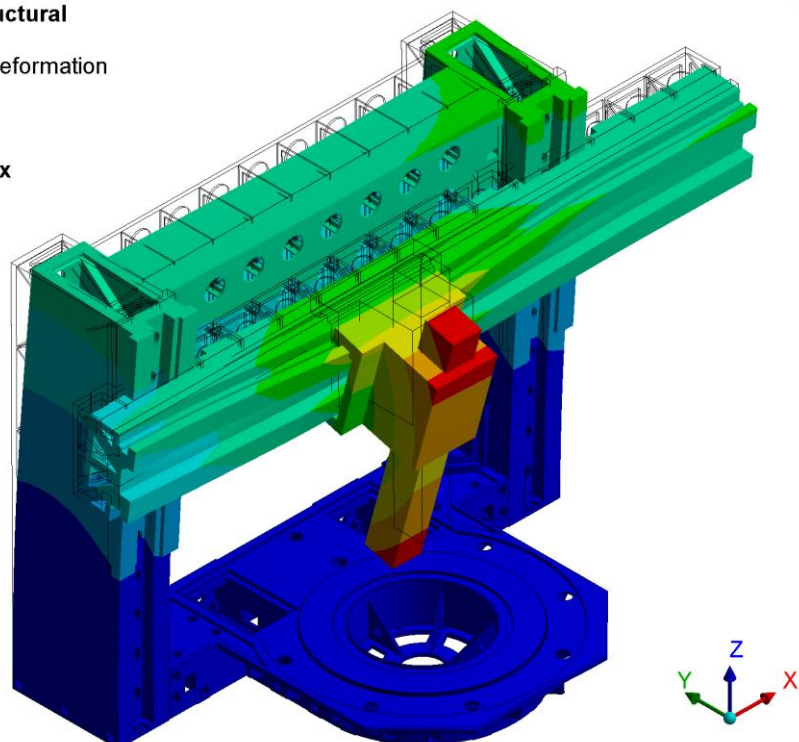
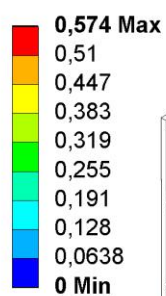
Obr. č. 11.1-1 Statický výpočet - síť konečných prvků

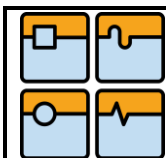
Typ prvku	TET10
Počet elementů	287 159
Počet uzlov	514 530



Obr. č. 11.1-2 Celková deformácia spôsobená ťiahou jednotlivých komponent

A: Static Structural
Figure
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1





Obr. č. 11.1-3 Deformácia v osi Y spôsobená tiažou jednotlivých komponent

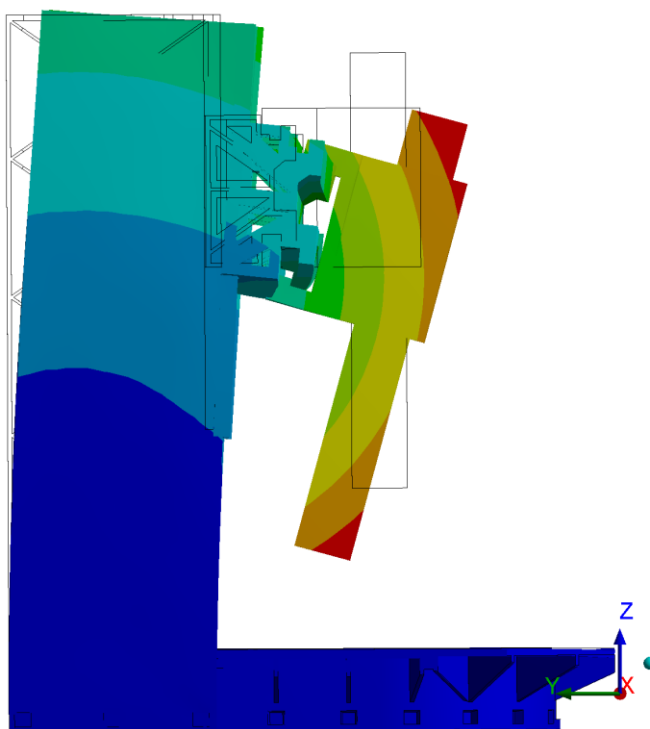
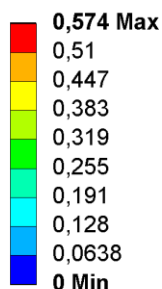
A: Static Structural

Figure

Type: Total Deformation

Unit: mm

Time: 1

ANSYS
14.0

Zhodnotenie:

Rám sa vplyvom gravitačného zrýchlenia deformuje, a to najmä v osi Y. Výpočet v tomto prevedení podáva mierne skresľujúce výsledky, pretože v praxi existujú určité opatrenia, ktoré odstraňujú napr. priehyb priečnika. Navyše vzájomná deformácia priečnik – suport je tiež nereálna, pretože vedenia majú určitú poddajnosť a neprišlo by k tak veľkej deformácii. Realisticky vyzerá priehyb oboch stojanov spolu s priečkou. Žiadne medzné stavy sa nevyskytujú. Mierne odchýlky môžu byť spojené s umiestneným ťažiska. Boli prispôbené hustoty, ale program umiestňuje gravitačnú konštantu vždy do ťažiska telesa, ktoré sa úpravami geometrie u jednotlivých telies mohli zmeniť. Deformácia tiež výrazne závisí od polohy suportu a šmýkadla, resp. myslenej špičky nástroja. V tomto prípade bol zvolený variant, kedy sa šmýkadlo nachádza presne nad stredom upínacej dosky, ktoré nie je súčasťou analýzy.

11.2. Nestacionárna analýza vedenia tepla

Pri odvodzovaní modelu bola použitá stacionárna analýza, teda predpoklad stavu, do ktorého by sústava postupne dospela. Zdroje tepla by museli pôsobiť určitú dobu, až kým by už nedochádzalo k vedeniu tepla. V bežnej praxi a najmä v oblasti výrobnej techniky sa podmienky teplotného zaťaženia menia s časom. Každému časovému okamžiku prislúcha unikátne rozloženie tepla a deformácia. Pri samotnom výpočte bol zvolený nasledovný postup:

- Nestacionárna analýza rozloženia teplôt v ráme
- Importovanie teplôt a následný výpočet deformácií, v časových okamžikoch
- Posúdenie vplyvu deformácie na rám, resp. presnosť

Výpočet bol uskutočnený pre zvolené dáta. Tabuľka zobrazuje teploty zdrojov, pre špecifické časové okamžiky. Všetky ostatné podmienky sú ako pri odvodzovaní modelu (kapitola 10).

Tabuľka 11.2-1 Zvolené teploty pre nestacionárnu analýzu

Čas [s]	HS Ložisko	GRAESSNER	HEYNAU
0	18,8	18,8	18,8
1200	34,5	56	51
1800	35,2	60	55
2400	29	46	42
3000	24,9	37	33
3600	19,8	25	23
4200	19,7	24	22
4800	19,3	23	21
5400	24	35	31
6000	23,2	31	27
7800	21,8	30	24
8400	25,2	40	32
9000	29,7	46	38
10200	18,8	25	24

Výpočet bol prevedený s krokom 60 s. V programe ANSYS je potrebné zadať teplotu v určitých bodoch. Teplota je medzi týmito bodmi dopyčítavaná pomocou lineárnej interpolácie. Na obrázku je zobrazený počiatok cyklu.

Tabuľka 11.2-2 Zadávanie teploty do programu ANSYS pre HS ložisko

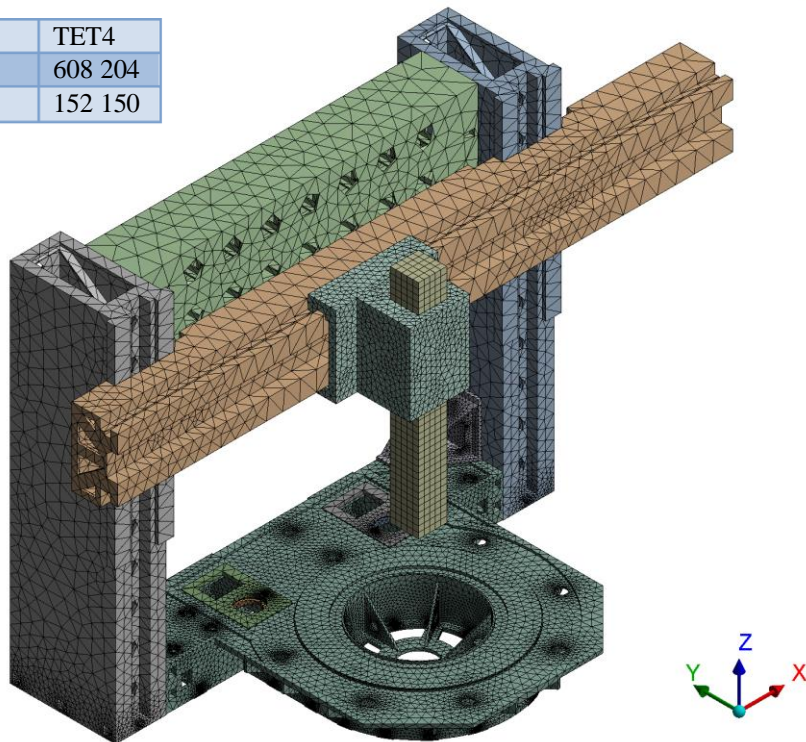
Tabular Data			
	Steps	Time [s]	Temperature [°C]
1	1	0,	= 18,8
2	1	60,	18,8
3	2	120,	= 19,626
4	3	180,	= 20,453
5	4	240,	= 21,279
6	5	300,	= 22,105
7	6	360,	= 22,932
8	7	420,	= 23,758
9	8	480,	= 24,584
10	9	540,	= 25,411
11	10	600,	= 26,237
12	11	660,	= 27,063
13	12	720,	= 27,889
14	13	780,	= 28,716
15	14	840,	= 29,542
16	15	900,	= 30,368
17	16	960,	= 31,195
18	17	1020,	= 32,021
19	18	1080,	= 32,847
20	19	1140,	= 33,674
21	20	1200,	34,5
22	21	1260,	= 34,57
23	22	1320,	= 34,64
24	23	1380,	= 34,71
25	24	1440,	= 34,78
26	25	1500,	= 34,85
27	26	1560,	= 34,92
28	27	1620,	= 34,99
29	28	1680,	= 35,06
30	29	1740,	= 35,13
31	30	1800,	35,2

Pre konečnoprvkovú sieť bol využitý najnovší nástroj programu ANSYS. Je možné použiť odlišnú sieť pre výpočet rozloženia teploty a napätovo-deformačnú charakteristiku.



Obr. č. 11.2-1 Sieť konečných prvků pro výpočet teplotního pole

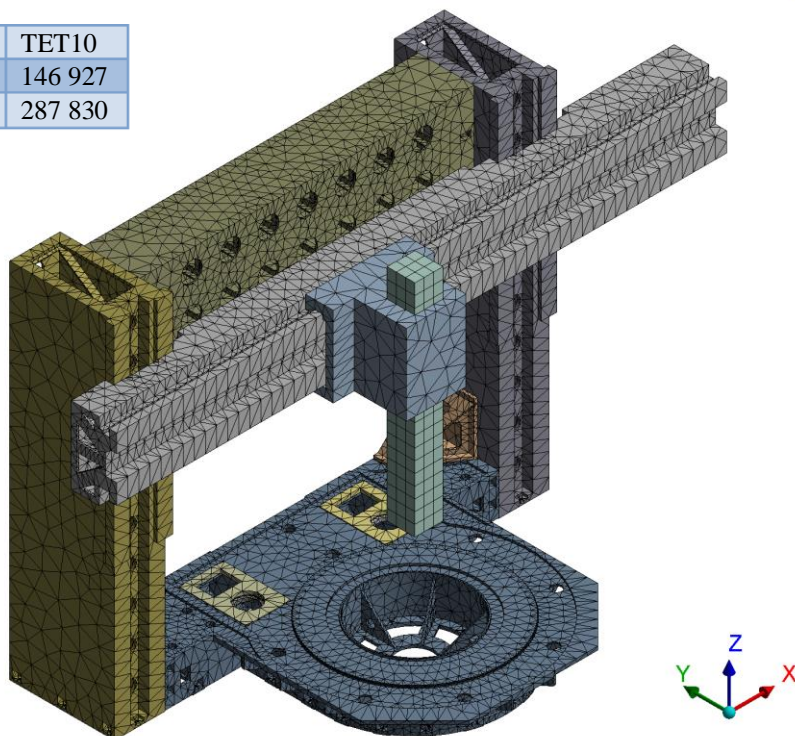
Typ prvku	TET4
Počet elementů	608 204
Počet uzlov	152 150



ANSYS
14.0

Obr. č. 11.2-2 Sieť konečných prvků pro výpočet teplotných deformácií

Typ prvku	TET10
Počet elementů	146 927
Počet uzlov	287 830



ANSYS
14.0

Pre zvolený cyklus bola vypočítaná teplota. Deformáciu je možné vypočítať pre každý časový okamih. V tomto prípade zvolené určité časové okamihy, pre ktoré boli deformácie počítané (lineárny výpočet).

Obr. č. 11.2-3 Deformácia vplyvom teplotného zaťaženia v čase 5000 s

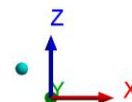
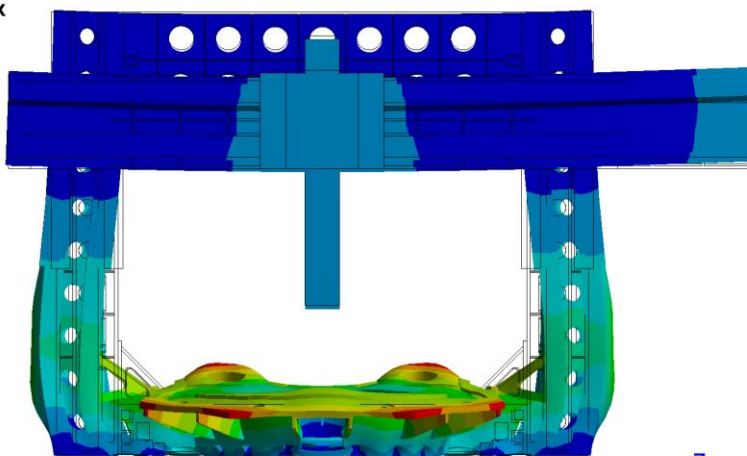
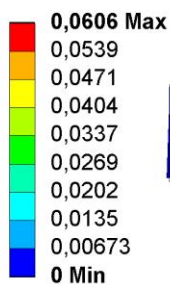
C: Static Structural

Figure

Type: Total Deformation

Unit: mm

Time: 1



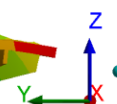
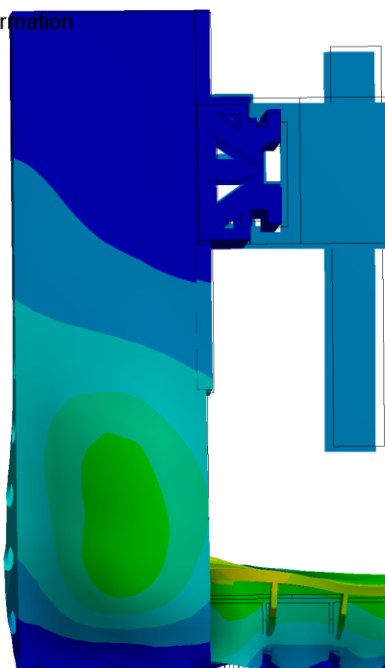
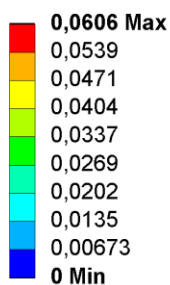
C: Static Structural

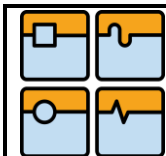
Figure

Type: Total Deformation

Unit: mm

Time: 1





Obr. č. 11.2-4 Deformácia lôžka v čase 5000 s

C: Static Structural

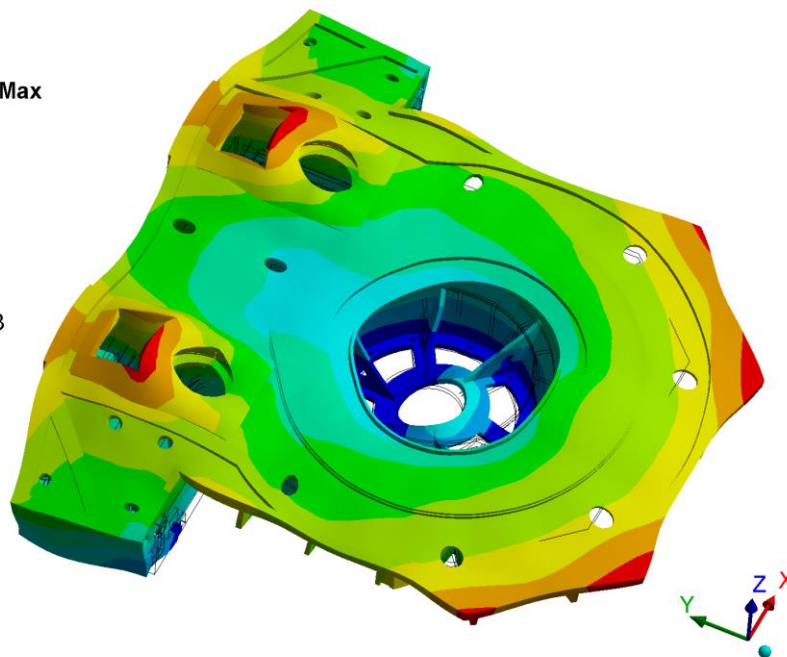
Figure

Type: Total Deformation

Unit: mm

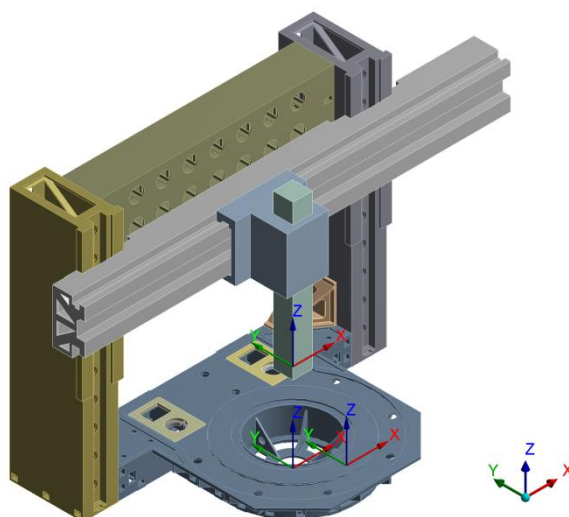
Time: 1

0,0606 Max
0,0539
0,0471
0,0404
0,0337
0,0269
0,0202
0,0135
0,00673
0 Min



Grafické zobrazenia deformácií v rôznych bodoch nemajú veľkú výpovednú hodnotu. Z predchádzajúcich obrázkov je pozorovateľné, že na deformáciu v ose Y má vplyv čiastočná deformácia celého rámu (mierne zaklonenie) a zároveň deformácia lôžka, na ktorom je pripevnené hydrostatické ložisko, ktoré sa vplyvom deformácie posúva a s ním aj upínacia doska sústruhu. Boli zvolené dva referenčné body: prvý v koncovom bode šmykadla (v jeho strede) a na ploche slúžiacej pre montáž ložiska. Vzájomným porovnaním týchto dvoch odchýlok je možné odhadnúť celkovú chybu.

Obr. č. 11.2-5 Referenčné body zaznamenávania odchýlky v smere Y

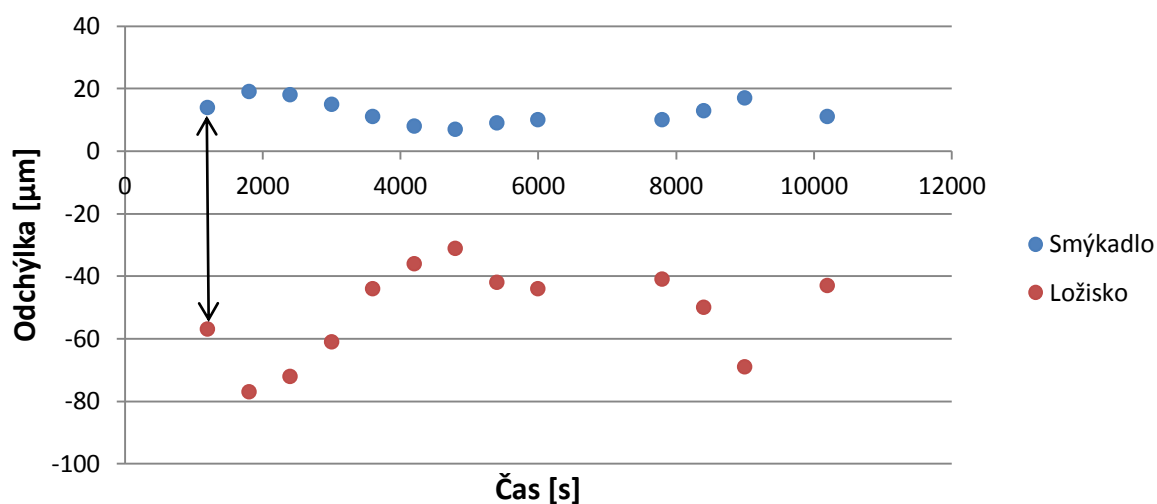





Tabuľka 11.2-3 Odchýlka v smere osi Y

ČAS [s]	Odchýlka - šmýkadlo [μm]	Odchýlka - ložisko [μm]
1200	14	-57
1800	19	-77
2400	18	-72
3000	15	-61
3600	11	-44
4200	8	-36
4800	7	-31
5400	9	-42
6000	10	-44
7800	10	-41
8400	13	-50
9000	17	-69

Deformácie v osi Y



	Ústav výrobných strojů, systémů a robotiky	Str. 70
	DIPLOMOVÁ PRÁCA	

ZÁVER

Tematika teplotných deformácií, ktoré spôsobujú nepresnosti na obrobku pri obrábaní patrí medzi aktuálne témy. Pri rozpracovaní práce som sa najprv prostredníctvom dostupnej literatúry a odborných článkov dôkladne zoznámil s problematikou teplotných deformácií u výrobných strojov. Tiež sa mi podarilo sčasti nahliadnuť do základných technologických postupov a techník pri výrobe zvislých sústružníckych centier v spoločnosti Toshulin.

V práci bol s využitím systémového prístupu navrhnutý výpočtový model, ktorý má byť využitý pri odstraňovaní nežiaducich teplotných deformácií. Napriek tomu, že v rešeršnej časti bolo pojednávané o náročnosti tvorbe modelov popisujúcich teplotne-elastické chovanie stroja, pri praktickom návrhu boli použité početné zjednodušenia. Napríklad neboli riešené podmienky týkajúce sa konvekcie. Určite by bolo zaujímavé sledovať turbulentné javy na rozhraní stroj-vzduch, ktoré by bolo možné modelovať v niektorom multifyzikálnom module programu ANSYS prípadne iného softvéru. Takéto výpočty by vyžadovali tiež veľký výpočtový výkon. Taktiež by museli byť uskutočnené mnohé merania, ktoré by dali modelu vierohodnú podobu.

Výpočtový model, ktorý som vytvoril má teda obmedzenú použiteľnosť. V poslednej kapitole sú zobrazené možné príklady použitia. Aby bolo možné model implementovať do praxe je potrebné uskutočniť merania v reálnom čase stroja. To znamená v jednom časovom okamžiku identifikovať všetky možné zdroje tepla a zmerať teplotné polia, ktoré budú použité ako okrajové podmienky. Model je tiež potrebné odladiť. Boli spravené zjednodušenia, u ktorých síce Metóda konečných prvkov potvrdila použiteľnosť, ale v praxi je možné, že vplyvom určitých podmienok príde k stavu, keď tieto zjednodušenie nie je možné uskutočniť.

V poslednej kapitole bolo tiež uvedené deformácie, ktoré spôsobuje rozloženie teplôt v časovom úseku. Táto analýza je použiteľná v praxi len veľmi obmedzene, pretože všetky teplotné zdroje majú tzv. tepelnú zotrvačnosť. Museli by byť uskutočnené nepretržité merania, ktoré by dávali presný obraz o teplotách v čase. Tieto teploty by poslúžili ako okrajové podmienky pre model. Aj napriek tomu by model slúžil len pre simuláciu deformačných charakteristík pre daný meraný cyklus. Pre simuláciu iných podmienok by museli byť merania uskutočnené znovu.

POUŽITÉ INFORMAČNÉ ZDROJE

- [1] BRYAN, J. International Status of Thermal Error Research (1990). *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 1990, vol. 39, issue 2, s. 645-656. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)63001-7. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607630017>
- [2] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. Vyd. 3., přeprac. / . Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, 284 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-2409-5.
- [3] KABÁT, Ernest. *Termomechanika: Termokinetika*. Bratislava: ALFA, 1984.
- [4] SERWAY, Raymond A, John W JEWETT a Vahé PEROOMIAN. *Physics for scientists and engineers with modern physics*. Ninth edition. 2014, xxxii, 1232, 52, 25 pages. ISBN 11-339-4727-1.
- [5] Thermal expansion. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_expansion
- [6] Konstrukce CNC obráběcích strojů: Teplotní kompenzace. In: NOVOTNÝ, Lubomír. *TECHTYDENÍK: Průmyslový portál* [online]. 2013 [cit. 2014-05-24]. Dostupné z: http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/konstrukce-obrabecich-stroju/konstrukce-cnc-obrabecich-stroju-4_20378.html
- [7] MINDL, Jiří. Pokročilé teplotní kompenzace portálového obráběcího centra. In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. 01.10.2013 [cit. 2014-05-24]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/pokrocile-teplotni-kompenzace-portaloveho-obrabeciho-centra.html>
- [8] MAREŠ, Martin, Otakar HOREJŠ, Jan HORNYCH a Jan SMOLIK. Robustness and portability of machine tool thermal error compensation model based on control of participating thermal sources. In: *Journal of Machine Engineering*. Wrocław: Wydawnictwo Wrocławskiej Rady FSNT NOT, 2013, s. 24-36. ISSN 1895-7595.
- [9] WECK, M., P. MCKEOWN, R. BONSE a U. HERBST. Reduction and Compensation of Thermal Errors in Machine Tools. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 1995, vol. 44, issue 2, s. 589-598. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60506-X. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S000785060760506X>
- [10] RAMESH, R, M. A MANNAN a A. N POO. Error compensation in machine tools — a review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2000, vol. 40, issue 9, s. 1257-1284. DOI: 10.1016/S0890-6955(00)00010-9. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695500000109>
- [11] MAYR, Josef, Jerzy JEDRZEJEWSKI, Eckart UHLMANN, M. ALKAN DONMEZ, Wolfgang KNAPP, Frank HÄRTIG, Klaus WENDT, Toshimichi MORIWAKI, Paul SHORE, Robert SCHMITT, Christian BRECHER, Timo WÜRZ a Konrad WEGENER. Thermal issues in machine tools. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2012, vol. 61, issue 2, s. 771-791. DOI: 10.1016/j.cirp.2012.05.008. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850612002077>
- [12] ISO 230-3. *Zásady zkoušek obráběcích strojů: Část 3: Určení tepelných vlivů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkoušebnictví, 2010.
- [13] DELBRESSINE, F.L.M., G.H.J. FLORUSSEN, L.A. SCHIJVENAARS a P.H.J. SCHELLEKENS. Modelling thermomechanical behaviour of multi-axis machine tools. *Precision Engineering*. 2006, vol. 30, issue 1, s. 47-53. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2005.05.005. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141635905000851>
- [14] Termodiagnostika obráběcích strojů. In: BACH, P. *Fakulta strojní: České vysoké učení technické* [online]. 2009 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12135-VSZ/download/obor_stud/SD_-2351086/F_Termodiagnostika_obrabecich_stroju.pdf
- [15] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. Vyd. 2, přeprac., rozš. Praha: MM publishing, 2010, 420 s. ISBN 978-80-254-7980-3.

- [16] JANÍČEK, Přemysl a Jiří MAREK. *Expertní inženýrství v systémovém pojetí*. 1. vyd. Praha: Grada, 2013, 592 s. Expert (Grada). ISBN 978-80-247-4127-7.
- [17] BENČA, Štefan. *Výpočtové postupy MKP pri riešení lineárnych úloh mechaniky*. Bratislava: STU Bratislava, 2004. ISBN 80-227-2404-1.

ZOZNAM OBRÁZKOV A TABULIEK

Obr. č. 2.1-1 Schematický prehľad základných pojmov [1].....	14
Obr. č. 2.1-1 Dilatačná medzera mostu (vľavo), deformácia koľajových tratí (vpravo) [5]	15
Obr. č. 2.1-2 Predstava atómov navzájom pospájaných tuhými pružinami.....	15
Obr. č. 3.1-1 Pridklady zdrojov tepla na frézovacom stroji [10]	20
Obr. č. 4.1-1 Typické usporiadanie skúšky pre obrábacie centrum so zvislou osou vretena [12].....	21
Obr. č. 4.1-2 Meranie teplotných deformácií pomocou ballbaru u 5-osého centra [13].....	22
Obr. č. 4.2-1 Laser tracker [Faro].....	22
Obr. č. 4.3-1 Termografická kamera [Testo].....	23
Obr. č. 4.3-2 Rozloženie teploty v lôžku karuselu [14].....	23
Obr. č. 5.1-1 Lôžko zvislého sústruhu zhotovené z HPC betónu [Toshulin], [15]	24
Obr. č. 5.1-2 Materiál s pozitívnym (AI) a negatívnym (CFRP) koeficientom teplotnej rozťažnosti	25
Obr. č. 5.2-1 Schéma nepriamej kompenzácie založená na prenosovej funkcii [8].....	26
Obr. č. 5.3-1 Schéma metódy FDEM	27
Obr. č. 5.4-1 Systém Okuma Thermo-Friendly Concept a vplyv systému TAS na presnosť vretena	28
Obr. č. 6.1-1 Prvky štruktúry modelovania	29
Obr. č. 7.1-1 Zvislé sústružnícke centrum Forceturn	32
Obr. č. 7.2-1 Schéma vytvárania systému podstatných veličín	34
Obr. č. 7.3-1 Geometrický model sústružníckeho centra Forceturn.....	35
Obr. č. 7.3-2 Pohľad na konštrukčné riešenie dier spolu so skrutkou kotvy	36
Obr. č. 7.3-3 Spojenie lôžka so stojanom.....	37
Obr. č. 7.3-4 Priečník.....	38
Obr. č. 7.3-5 Suport so šmýkadlom	38
Obr. č. 7.3-6 Saňová časť suportu spolu s usporiadaním valivých elementov.....	39
Obr. č. 7.3-7 Šmýkadlová časť suportu s valivými elementmi.....	39
Obr. č. 7.3-8 Montážne otvory pre planétovú prevodovku.....	40
Obr. č. 7.3-9 Konštrukčné spojenie kužeľovej prevodovky s lôžkom	41
Obr. č. 7.3-10 Zobrazenie plochy ovplyvnenej olejom z HS ložiska.....	41
Obr. č. 8.2-1 Použitý softvér	44
Obr. č. 10.1-1 Použité elementy	47
Obr. č. 10.1-2 Väzby v mieste uloženia rámu na základ	49
Obr. č. 10.1-3 Zobrazenie odstránenia dier z lôžka	50
Obr. č. 10.1-4 Model č. 1 - geometria.....	51
Obr. č. 10.1-5 Referenčné body, v ktorý bude porovnávaná veľkosť deformácie	51
Obr. č. 10.1-6 Model č.1 - sieť konečných prvkov	52
Obr. č. 10.1-7 Model č. 1 - detailné pohľady na sieť	52
Obr. č. 10.1-8 Model č. 1 - rozloženie teplôt.....	53
Obr. č. 10.1-9 Model č. 1 - deformačná charakteristika.....	54
Obr. č. 10.1-10 Vybrané geometrické úpravy - model č. 2	55
Obr. č. 10.1-11 Úprava súboru dištančných kusov	56
Obr. č. 10.1-12 Model č. 2 - geometria.....	56
Obr. č. 10.1-13 Model č. 2 - sieť konečných prvkov	57
Obr. č. 10.1-14 Odstránenie zaoblení - model č. 3	58
Obr. č. 10.1-15 Zjednodušenie geometrie stojanov	59
Obr. č. 10.1-16 Model č.3 - geometria.....	59
Obr. č. 10.1-17 Model č. 3 - sieť konečných prvkov	60
Obr. č. 10.1-18 Detailný pohľad na sieť konečných elementov	60
Obr. č. 10.2-1 Kompletý model - geometria.....	61
Obr. č. 11.1-1 Statický výpočet - sieť konečných prvkov	63
Obr. č. 11.1-2 Celková deformácia spôsobená tiažou jednotlivých komponent.....	63
Obr. č. 11.1-3 Deformácia v osi Y spôsobená tiažou jednotlivých komponent.....	64

Obr. č. 11.2-1 Sieť konečných prvkov pre výpočet teplotného poľa.....	66
Obr. č. 11.2-2 Sieť konečných prvkov pre výpočet teplotných deformácie.....	66
Obr. č. 11.2-3 Deformácia vplyvom teplotného zaťaženia v čase 5000 s.....	67
Obr. č. 11.2-4 Deformácia lôžka v čase 5000 s.....	68
Obr. č. 11.2-5 Referenčné body zaznamenávania odchýlky v smere Y.....	68
Tabuľka 7.3-1 Materiál jednotlivých komponent.....	42
Tabuľka 7.3-2 Vybrané materiálové charakteristiky.....	42
Tabuľka 10.1-1 Model č. 1 - parametre.....	54
Tabuľka 10.1-2 Model č.2 - parametre.....	57
Tabuľka 10.1-3 Model č. 3 - parametre.....	60
Tabuľka 11.1-1 Priradenie hustôt jednotlivým častiam modelu	62
Tabuľka 11.2-1 Zvolené teploty pre nestacionárnu analýzu	65
Tabuľka 11.2-2 Zadávanie teploty do programu ANSYS pre HS ložisko	65
Tabuľka 11.2-3 Odchýlka v smere osi Y.....	69

PRÍLOHY

Na priloženom CD: Diplomová práca.doc